

Órgano de Difusión de Investigación  
Científica, Tecnológica y Humanística

# CienciaUAT

Registro ISSN 2007-7858



VERDAD, BELLEZA, PROBIDAD

## Incidencia de rabia paralítica bovina asociada a la presencia del vampiro común

VOLUMEN 19  
NÚMERO 2 ENE-JUN  
2025



Grandes y medianos  
mamíferos en el Área Natural  
Protegida Altas Cumbres (México)

Conductas de riesgo vinculadas a  
los accidentes automovilísticos

# INFORMACIÓN PARA EL MUNDO DESDE TU UNIVERSIDAD



[www.revistaciencia.uat.edu.mx](http://www.revistaciencia.uat.edu.mx)

**Tel. (834) 3181800 ext. 2905**  
**e-mail: [cienciauat@uat.edu.mx](mailto:cienciauat@uat.edu.mx)**

# Directorio

---

**MVZ MC Dámaso Leonardo Anaya Alvarado**

**Rector**  
**Universidad Autónoma de**  
**Tamaulipas**

---

**Dra. María Concepción Placencia Valadez**

**Secretaria General**

---

**Dr. Fernando Leal Rios**

**Secretario de Investigación y Posgrado**

---

**Dra. Rosa Issel Acosta González**

**Secretaria Académica**

---

**Dra. Dora María Lladó Lárraga**

**Secretaria Técnica del Consejo de**  
**Publicaciones**  
**Dirección de Investigación**

---

*CienciaUAT. Año: 2025, Volumen: 19, Número: 2, enero-junio. Publicación multidisciplinaria semestral editada por la Universidad Autónoma de Tamaulipas, a través del Consejo de publicaciones de la Secretaría de Investigación y Posgrado, Matamoros S/N, Zona Centro, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, C.P. 87000; Tels. (834) 3181800 y 3181700, ext. 2905. Página web: <https://revistaciencia.uat.edu.mx> y correo electrónico: [cienciauat@uat.edu.mx](mailto:cienciauat@uat.edu.mx). Editor responsable: Dr. José Alberto Ramírez de León. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2016-053110082800-203, ISSN impreso: 2007-7521, ISSN electrónico: 2007-7858; ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Dr. José Alberto Ramírez de León. Fecha de la última modificación: 31 de enero de 2025.*

*Se permite la reproducción del contenido para actividades no comerciales dando los créditos correspondientes a la revista CienciaUAT. Los artículos e investigaciones son responsabilidad de los autores.*

# Prólogo

---

## Estimados lectores:

Es un placer compartir con ustedes este nuevo número de CienciaUAT en el que se plasma el conocimiento generado por investigadores de diferentes campos y disciplinas del saber.

En el área de Biología y Química, los investigadores analizan la riqueza y abundancia de las poblaciones de grandes y medianos mamíferos que habitan en el Área Natural Protegida Altas Cumbres, ubicada en Tamaulipas, México, con énfasis en el riesgo ecológico por actividades antrópicas. Revisan los indicadores de sustentabilidad que han sido considerados estratégicos para evaluar a las Áreas Naturales Protegidas, así como los investigadores líderes en el campo y sus redes de colaboración. También describen cuáles son los metabolitos secundarios, con funciones benéficas para la salud, que están presentes en plantas herbáceas que abundan en la Huasteca veracruzana.

En Medicina y Ciencias de la Salud, se da a conocer la importancia de los canales de transportación del ion calcio en la fisiología y desarrollo de las células cancerígenas.

Los investigadores del área de Humanidades y Ciencias de la Conducta indican los rasgos que presenta un docente universitario, asociados a desarrollar competencias de emprendimiento en sus estudiantes. Muestran la tasa de riesgo de uso excesivo del teléfono móvil por parte de estudiantes de bachillerato y universidad, así como si el nivel de su uso se relaciona con sus preferencias sensoriales de adquisición de conocimiento. Señalan, además, cuáles son las conductas de riesgo asociadas con accidentes vehiculares que asumen los conductores.

En las Ciencias Sociales, se estima el costo que tendría en diferentes países y ciudades, el impacto en sus infraestructuras portuarias y costeras, si se incrementa el nivel del mar.

En el área de Biotecnología y Ciencias Agropecuarias, los autores describen la epidemiología de la rabia paralítica bovina y su asociación con su principal vector el murciélago hematófago denominado vampiro común, con un análisis de cómo la distribución de este organismo está avanzando hacia nuevos nichos en el estado. Además, demuestran que es posible encapsular compuestos bioactivos con capacidad antigúngica para controlar plagas en frutas utilizando proteína de haba y secado por aspersión. También dan a conocer una estrategia para mejorar el rendimiento de trigo harinero combinando la fotografía aérea, el uso de drones y los índices de color de vegetación de las plantas.

En el área de Ingeniería, se da a conocer un ingenioso sistema para controlar la operación de un dedo biónico con la finalidad de bajar los costos de producción de las prótesis.

Esperamos que este número contribuya a expandir su conocimiento e interés en los temas investigados.

Verdad, Belleza, Probidad



**MVZ MC Dámaso Leonardo**  
**Anaya Alvarado**  
**Rector**  
**Universidad Autónoma de Tamaulipas**

## EDITOR RESPONSABLE

Dr. José Alberto Ramírez de León (SNI III)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas*  
 E-mail: ramirez@uat.edu.mx

## EDITORES DE INGLÉS

Dr. Alberto Mora Vázquez (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*

Dra. Nelly Paulina Trejo Guzmán (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*

FÍSICA, MATEMÁTICAS  
Y CIENCIAS DE LA TIERRA

Dra. Evelia Reséndiz Balderas (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Héctor Vázquez Leal (SNI III)  
*Universidad Veracruzana, México*  
 Dr. José Alberto Batista Rodríguez (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Coahuila, México*



## BIOLOGÍA Y QUÍMICA

Dr. Arturo Mora Olivo (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Chapingo, México*  
 Dra. Elisa Serviere Zaragoza (SNI II)  
*Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., México*  
 Dr. Enrique Jurado Ybarra (SNI III)  
*Universidad Autónoma de Nuevo León, México*  
 Dr. Enrique Richard  
*Universidad San Gregorio de Portoviejo, Calceta, Manabí, Ecuador*  
 Dr. Enrique Ruiz Cancino (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Gildardo Rivera Sánchez (SNI III)  
*Instituto Politécnico Nacional, México*  
 Dr. Javier Jiménez Pérez (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Nuevo León, México*  
 Dra. Juana María Coronado Blanco (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dra. Lía Celina Méndez Rodríguez (SNI II)  
*Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., México*  
 Dr. Manuel León Camacho  
*Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España*  
 Dr. Víctor López Martínez (SNI II)  
*Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México*  
 Dra. María Guadalupe Aguilar Uscanga (SNI II)  
*Instituto Tecnológico de Veracruz, México*

MEDICINA Y CIENCIAS DE LA  
SALUD

Dr. Aldo Fidel Izaguirre Hernández  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Amaury de Jesús Pozos Guillén (SNI III)  
*Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México*  
 Dr. Carlos Javier Pineda Villaseñor (SNI III)  
*Instituto Nacional de Rehabilitación, México*  
 Dr. Francisco Vázquez Nava (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Guillermo Manuel Ceballos Reyes (SNI III)  
*Instituto Politécnico Nacional, México*  
 Dr. Juan Miguel Jiménez Andrade (SNI III)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dra. Montserrat Bacardi Gascón (SNI III)  
*Universidad Autónoma de Baja California, México*  
 Dra. Octelina Castillo Ruiz (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Sandro Fernandes Da Silva  
*Universidade Federal de Lavras, Brasil*  
 Dr. Virgilio Bocanegra García (SNI II)  
*Instituto Politécnico Nacional, México*

HUMANIDADES Y  
CIENCIAS DE LA CONDUCTA

Dr. Fernando Flores Camacho (SNI II)  
*Universidad Nacional Autónoma de México, México*  
 Dr. José Luis Ybarra Sagarduy (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dra. Marcela Alejandra Tiburcio Sainz (SNI II)  
*Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz, México*  
 Dra. María Guadalupe Moreno Bayardo (SNI II)  
*Universidad de Guadalajara, México*  
 Dra. María Elena Rivera Heredia (SNI I)  
*Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México*  
 Dra. María Elena Teresa Medina-Mora Icaza (SNI III)  
*Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz, México*  
 Dr. Octavio Herrera Pérez (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Rubén Salvador Roux Gutiérrez (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Coahuila, México*



## CIENCIAS SOCIALES

Dr. Aidé Aracely Maldonado Macías (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México*  
 Dr. Antonio Hidalgo Nuchera  
*Universidad Politécnica de Madrid, España*  
 Dr. Arturo Zárate Ruiz  
*El Colegio de la Frontera Norte, México*  
 Dra. Cirila Quintero Ramirez (SNI III)  
*Colegio de la Frontera Norte de Tamaulipas, México*  
 Dr. Ernesto Aguayo Téllez (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Nuevo León, México*  
 Dr. Francisco García Fernández (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dra. Guadalupe Correa Cabrera  
*George Mason University, Estados Unidos*  
 Dra. Guillermina Natera Rey (SNI III)  
*Secretaría de Salud, México*  
 Dra. Joana Cecilia Chapa Cantú (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Nuevo León, México*  
 Dr. José Antonio Aparisi Caudeli  
*Universidad de Valencia, España*  
 Dr. Juan Alfredo Tuesta Panduro  
*Universidad Privada del Norte, Perú*  
 Dra. Julieta María Ana Quilodrán Salgado (SNI II)  
*El Colegio de México, México*  
 Dra. Karla Lorena Andrade Rubio (SNI III)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dra. Lucila Hinojosa Córdova (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Nuevo León, México*  
 Dra. María Isabel de la Garza Ramos (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Miguel Díaz Barriga  
*University of Texas Rio Grande Valley, Estados Unidos*  
 Dra. Mónica Lorena Sánchez Limón (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dra. Mónica Regina De Arteché  
*Universidad de San Andrés, Argentina*  
 Dr. Oscar Misael Hernández Hernández (SNI II)  
*Colegio de la Frontera Norte de Tamaulipas, México*  
 Dr. Rodolfo Casillas Ramírez  
*Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, México*  
 Dr. Simón Pedro Izcara Palacios (SNI III)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dra. Karla Villarreal Sotelo (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*

BIOTECNOLOGÍA Y  
CIENCIAS AGROPECUARIAS

Dr. Alejandro Espinosa Calderón (SNI III)  
*Tecnológico Nacional de México, México*  
 Dra. Ana Belén Moldes Menduina  
*Universidad de Vigo, España*  
 Dr. Carlos Alberto Gómez Aldapa (SNI II)  
*Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México*  
 Dra. Elizabeth Carvajal Millán (SNI III)  
*Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo AC, México*  
 Dr. Enrique Márquez Ríos (SNI III)  
*Universidad de Sonora, México*  
 Dra. Eugenia Guadalupe Cienfuegos Rivas (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Francisco Guevara Hernández (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Chiapas, México*  
 Dr. Francisco Infante Martínez (SNI II)  
*El Colegio de la Frontera Sur, México*  
 Dr. Gonzalo Velazquez de la Cruz (SNI III)  
*Instituto Politécnico Nacional, México*  
 Dr. Iván Moreno Andrade (SNI II)  
*Universidad Nacional Autónoma de México, México*  
 Dr. Jaime Salinas Chavira (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Jesús Genaro Sánchez Martínez (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. José Alberto Gallegos Infante (SNI III)  
*Instituto Tecnológico de Durango, México*  
 Dr. José Manuel Cruz Freire  
*Universidad de Vigo, España*  
 Dr. Juan Arturo Ragazzo Sánchez (SNI III)  
*Instituto Tecnológico de Tepic, México*  
 Dr. Juan Carlos Martínez González (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Juan L. Silva  
*Mississippi State University, Estados Unidos*  
 Dr. Julio Martínez Burnes (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Luis Angel Rodríguez del Bosque (SNI III)  
*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, México*  
 Dr. Manuel Vázquez Vázquez  
*Universidad de Santiago de Compostela, España*  
 Dra. María Jesús Alcalde Aldea  
*Universidad de Sevilla, España*  
 Dra. Montserrat Calderón Santoyo (SNI II)  
*Instituto Tecnológico de Tepic, México*  
 Dr. Netzahualcoyotl Mayek Pérez (SNI III)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dra. Rocio Margarita Uresti Marin (SNI I)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Roberto Pérez Castañeda (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dra. Rosa María Oliart Ros (SNI III)  
*Instituto Tecnológico de Veracruz, México*  
 Ph. D. Rubén Francisco González Laredo (SNI III)  
*Tecnológico Nacional de México, México*



## INGENIERÍAS

Dr. Eduardo Morales Sánchez (SNI II)  
*Instituto Politécnico Nacional, México*  
 Dr. Daniel Alberto May Arrijoja (SNI III)  
*Centro de Investigaciones en Óptica, México*  
 Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza (SNI II)  
*Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México*  
 Dr. Ramón Ventura Roque Hernández (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Tamaulipas, México*  
 Dr. Rodolfo Abraham Pazos Rangel (SNI II)  
*Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, México*  
 Dr. Rumen Ivanov Tsonchev (SNI II)  
*Universidad Autónoma de Zacatecas, México*

# ÍNDICE / TABLE OF CONTENTS

VOL. 19 No. 2: ENERO-JUNIO 2025

## BIOLOGÍA Y QUÍMICA

### 06 Mamíferos del bosque de encino en el ANP Altas Cumbres, Tamaulipas, México: riqueza de especies, abundancia relativa y adaptaciones ecológicas

Medium and large-sized mammals of the oak forest in the Altas Cumbres PNA, Tamaulipas, Mexico: species richness, relative abundance and ecological adaptations

Roberto Emmanuel Hernández -Jasso  
Zavdiel Alfonso Manuel-de-la-Rosa  
Gabriela Rubí Mendoza-Gutiérrez  
Leroy Soria-Díaz

### 25 Indicadores de sustentabilidad para Áreas Naturales Protegidas

Sustainability indicators for Protected Natural Areas

David Muñoz-Marcelino  
María Concepción Martínez-Rodríguez  
Alejandro D. Camacho-Vera

### 44 Metabolitos secundarios en plantas herbáceas de la Huasteca veracruzana, México

Secondary metabolites in herbaceous plants from the Huasteca veracruzana, Mexico

Lorena Casanova-Pérez  
Hugo Brígido Barrios-García  
Verónica Rosales-Martínez

## MEDICINA Y CIENCIAS DE LA SALUD

### 63 Transportadores de Ca<sup>2+</sup> y su papel en las características distintivas del cáncer

Ca<sup>2+</sup> transporters and their role in the cancer hallmarks

Indra Nicole Monge-Hernández  
Juan Santiago-García

## HUMANIDADES Y CIENCIAS DE LA CONDUCTA

### 78 Rasgos del docente universitario asociados a un perfil asesor de emprendimiento

Traits of university professors associated with an entrepreneurial advisor profile

Daniel Eduardo Paz-Pérez  
Ma. Gabriela Mendoza-Hernández

### 93 Conductas de riesgo y conocimiento de componentes del automóvil asociados a los accidentes de tránsito en universitarios del sur de Tamaulipas

Risk behaviors and knowledge of automobile components associated with traffic accidents in workers and university students in southern Tamaulipas

Ennio Héctor Carro-Pérez  
Arturo Secundino Hernández-Gómez  
Oscar Eliezer Mendoza-De Los Santos  
Brenda Itzel Herrera-Barajas

# CienciaUAT

### 107 Adicción al teléfono inteligente y preferencias sensoriales, en bachilleres y universitarios mexicanos

Smartphone addiction and modal preferences in Mexican bachelor and college students

Ismael Esquivel-Gómez  
Jorge Luis Vázquez-Ariza  
Martín Guerrero-Posadas  
Julio César Berthely-Barrios

## CIENCIAS SOCIALES

### 123 Estudios sobre el costo del impacto por el incremento en el nivel del mar en los puertos y las metodologías empleadas para su cálculo: una revisión sistemática

Studies on the economic impact of sea-level rise on ports and the methodologies used for its calculation: a systematic review

Luis Jesús Rodríguez-Aguilar  
María Cristina Garza-Lagler  
Violeta Zetzangari Fernández-Díaz

## BIOTECNOLOGÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

### 140 Extracto de *Randia monantha* encapsulado con proteína de haba (*Vicia faba*): actividad antifúngica *in vitro* y caracterización fisicoquímica

*Randia monantha* extract encapsulated with faba bean (*Vicia faba*) protein: *in vitro* antifungal activity and physicochemical characterization

Claudia Marcela Guillén-Jiménez  
Montserrat Calderón-Santoyo  
Katia Nayely González-Gutiérrez  
Juan Arturo Ragazzo-Sánchez

### 156 La rabia paralítica bovina en el estado de Tamaulipas desde la perspectiva de la distribución de su principal reservorio, el vampiro común (*Desmodus rotundus*)

Bovine paralytic rabies in the state of Tamaulipas from the perspective of the distribution of its main reservoir, the common vampire bat (*Desmodus rotundus*)

José Ignacio Olave-Leyva  
Julio Martínez-Burnes  
Leroy Soria-Díaz  
Álvaro Aguilar-Setién  
Nidia Aréchiga-Ceballos

### 176 Asociación de índices de vegetación RGB con rendimiento y dosis de nitrógeno en trigo harinero

Association of RGB vegetation indices with yield and nitrogen dose in bread wheat

Andrés Mandujano-Bueno  
Juan Francisco Buenrostro-Rodríguez  
Victor Montero-Tavera

## INGENIERÍAS

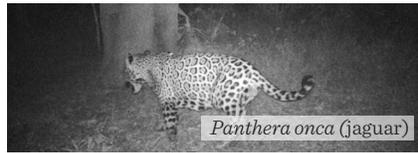
### 189 Evaluación de desempeño de controladores para un sistema de dedo biónico

Performance evaluation of controllers for a bionic finger system

Erick Javier Sánchez-Garnica  
Liliam Rodríguez-Guerrero  
Rocío Ortega-Palacios  
Omar Jacobo Santos-Sánchez



Puma concolor (puma)



Panthera onca (jaguar)



Urocyon cinereoargenteus (zorra gris)

Imágenes de: Roberto Emmanuel Hernández Jasso

# Mamíferos del bosque de encino en el ANP Altas Cumbres, Tamaulipas, México: riqueza de especies, abundancia relativa y adaptaciones ecológicas

## Medium and large-sized mammals of the oak forest in the Altas Cumbres PNA, Tamaulipas, Mexico: species richness, relative abundance and ecological adaptations

Roberto Emmanuel Hernández -Jasso<sup>1\*</sup>, Zavdiel Alfonso Manuel-de-la-Rosa<sup>2</sup>, Gabriela Rubí Mendoza-Gutiérrez<sup>2</sup>, Leroy Soria-Díaz<sup>3</sup>

### RESUMEN

El Área Natural Protegida (ANP) Altas Cumbres presenta un incremento de perturbaciones antrópicas, particularmente la zona sur. Sin embargo, su efecto sobre comunidades de mamíferos medianos y grandes ha sido escasamente explorado. El objetivo del presente estudio fue analizar la estructura de sus comunidades mediante la estimación de la riqueza de especie, abundancia relativa y adaptaciones ecológicas. Entre septiembre de 2020 y noviembre de 2021 se realizó un muestreo de mamíferos en el bosque de encino, ubicado al sur del ANP Altas Cumbres, utilizando dos técnicas: búsqueda de evidencia física (60 km de recorrido) y fototrampeo (2 270 d/trampa). Se registraron 23 especies de mamíferos, de las cuales 16 fueron de origen nativo y 7 introducidos (doméstico). Se reconocieron 6 órdenes, de los que Carnívora presentó el mayor número de especies (10 nativas y 2 domésticas), seguido por Artiodactyla (3 nativas y 3 domésticas), Perissodactyla (2 domésticas) y finalmente Cingulata, Didelphimorphia y Lagomorpha con 1 especie nativa cada una. Se registró una elevada riqueza de mamíferos medianos y grandes, lo que indica un buen estado de conservación. Sin embargo, la alta abundancia relativa de especies domésticas, como *Canis familiaris* (que pueden volverse ferales) evidencian las primeras señales de alarma, ya que sitúan en riesgo a algunas especies nativas. Es importante continuar con el monitoreo a largo plazo de los mamíferos medianos y grandes de la vegetación bosque encino, incluso ampliarla a toda el ANP Altas Cumbres.

**PALABRAS CLAVE:** trampas cámara, especies introducidas, listado taxonómico, Ciudad Victoria.

### ABSTRACT

The Altas Cumbres Protected Natural Area shows increased anthropogenic disturbances, particularly in the southern zone. However, its effect on communities of medium and large-size mammals has been little explored. This study aims to analyze its community structure by estimating the species richness, relative abundance, and ecological adaptations. Between September 2020 and November 2021, mammal sampling was carried out in the oak forest of the Altas Cumbres PNA using two techniques: search for physical evidence and camera trapping. Through 60 km traveled (capture effort) and an effort of 2 270 d/trap, 23 species of mammals were recorded, of which 16 correspond to taxa of native origin and 7 introduced mammals (domestic). Six orders were recognized, of which Carnívora presented the highest number of species (10 natives and 2 domestics), followed by Artiodactyla (3 natives and 3 domestics), Perissodactyla (2 domestic species), and finally Cingulata, Didelphimorphia and Lagomorpha, with 1 species each. A high richness of medium and large-sized mammals was recorded, indicating good conservation management. However, the high relative abundance of domestic species, such as *Canis familiaris* (which can become feral) show the first warning signs, since they put some native species at risk. It is important to continue long-term monitoring of medium and large-size mammals in the oak forest vegetation, and even expand it to the entire Altas Cumbres PNA.

**KEYWORDS:** camera traps, introduced species, taxonomic list, Ciudad Victoria.

\*Correspondencia: biohdz@yahoo.com/Fecha de recepción: 17 de septiembre de 2024/Fecha de aceptación: 20 de enero de 2025/Fecha de publicación: 27 de enero de 2025.

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Antropología e Historia Centro INAH Yucatán, calle 10, núm. 310 Letra "A" entre Prolongación Paseo Montejo y calle 1Bis, col. Gonzalo Guerrero, Mérida, Yucatán, México, C. P. 97119. <sup>2</sup> Universidad Autónoma de Tamaulipas, Instituto de Ecología Aplicada, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, C. P. 87019. <sup>3</sup>Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia "Dr. Norberto Treviño Zapata", Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, C. P. 87000.

## INTRODUCCIÓN

Ubicada en los municipios de Victoria y Jau-mave, Tamaulipas, el Área Natural Protegida (ANP) denominada Altas Cumbres fue declarada como Zona Especial Sujeta a Conservación Ecológica (ZESCE) en 1997 por el Gobierno del Estado, con el objetivo de proteger y restaurar las fuentes de abastecimiento de agua para Ciudad Victoria (perteneciente al municipio de Victoria), conservar y rehabilitar la flora y fauna, regular las actividades recreativas, la ganadería y los asentamientos humanos, y proteger los sitios arqueológicos (como el Balcón de Montezuma) y paleontológicos (Formación el Huizachal y el Cañón de la Peregrina) (Periódico Oficial del Estado de Tamaulipas, 1997). Esto permitió avances en materia de protección y conservación de los ecosistemas y su biodiversidad, de forma tal que, el programa de manejo de Altas Cumbres reportó, recientemente, 283 especies de vertebrados, de los cuales 58 % correspondieron a aves, 22 % a mamíferos, 14 % a reptiles, 4 % a anfibios y 2 % a peces (Gobierno de Tamaulipas/IEA-UAT, 2014).

El bosque de encino es la comunidad vegetal más extensa del ANP Altas Cumbres, abarcando 10 761.52 m<sup>2</sup> (García-Morales, 2009; Gobierno de Tamaulipas/IEA-UAT, 2014). Gran parte de esta comunidad arbórea se ubica en la porción sur, la cual agrupa también la mayor cantidad de actividad antrópica, como es la extracción minera y pétreo (plomo, zinc, serpentina, asbesto, fosforita, talco, titanio, níquel, cobalto, trituradoras de agregados pétreos, grava y arena (Servicio Geológico Mexicano, 2010). Además, se han incrementado los asentamientos urbanos en la periferia (5 colonias y asentamientos irregulares); así como el desarrollo del turismo recreativo (parque ecoturístico “Los Janambres”, parque ecológico y mirador “Camino Real a Tula”, la zona arqueológica el Balcón de Montezuma, Jardín Botánico del ejido El Huizachal, balnearios públicos “El Indio”, “La Peñita”, “El Edén y “El Paraíso”) (Gobierno de Tamaulipas/IEA-UAT, 2014; Caballero-Rico, 2019); y el paso de carreteras en el interior (carretera Federal 101 Tamaulipas-San Luis Potosí, carretera estatal 126 y el Antiguo Camino Real a Tula).

Existen pocos estudios científicos reportados de esta área. La mayoría enfocados en los tipos de vegetación y flora (García-Morales, 2009; García-Morales y Vargas-Vázquez, 2014) y en especies puntuales (Vargas-Contreras y col., 2023; Wong-Smer y col., 2022; Hernández-Jasso y col., 2024). Sin embargo, se desconoce el impacto que las actividades antrópicas están generando en la fauna, en especial en los taxones de mayor tamaño, que generalmente son los más susceptibles a las actividades humanas, por lo tanto, presentan un mayor riesgo de extinción (Dirzo y col., 2014). Los mamíferos terrestres medianos y grandes albergan una gran diversidad morfológica y capacidad de adaptación, lo que les ha permitido ocupar casi todos los ecosistemas del planeta (Pali-za-García, 2018). Este grupo ha sido de gran interés para el monitoreo de la biodiversidad y el estado del ambiente de una determinada localidad, debido a que tienen efectos importantes en la productividad primaria de los ecosistemas terrestres a través del intercambio de nutrientes, flujo de energía y procesos ecológicos, según la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2022). Además, muchas especies son susceptibles a los cambios en la calidad del hábitat (Baillie y col., 2008; Rumiz, 2010; Ahumada y col., 2011) funcionando como indicador del estado de la integridad ecológica (Sunquist y Sunquist, 2002; Ahumada y col., 2011).

El impacto que tienen las perturbaciones en la estructura de comunidades de mamíferos se puede medir bajo diferentes enfoques. Entre los ejemplos más conocidos están la estimación de la riqueza de especies y su abundancia relativa (Moreno, 2001; Salazar-Ortiz y col., 2020; 2022); o a través del desempeño de las especies en los ecosistemas, según sus adaptaciones ecológicas (masa corporal, locomoción y gremios tróficos) (Morin, 2011).

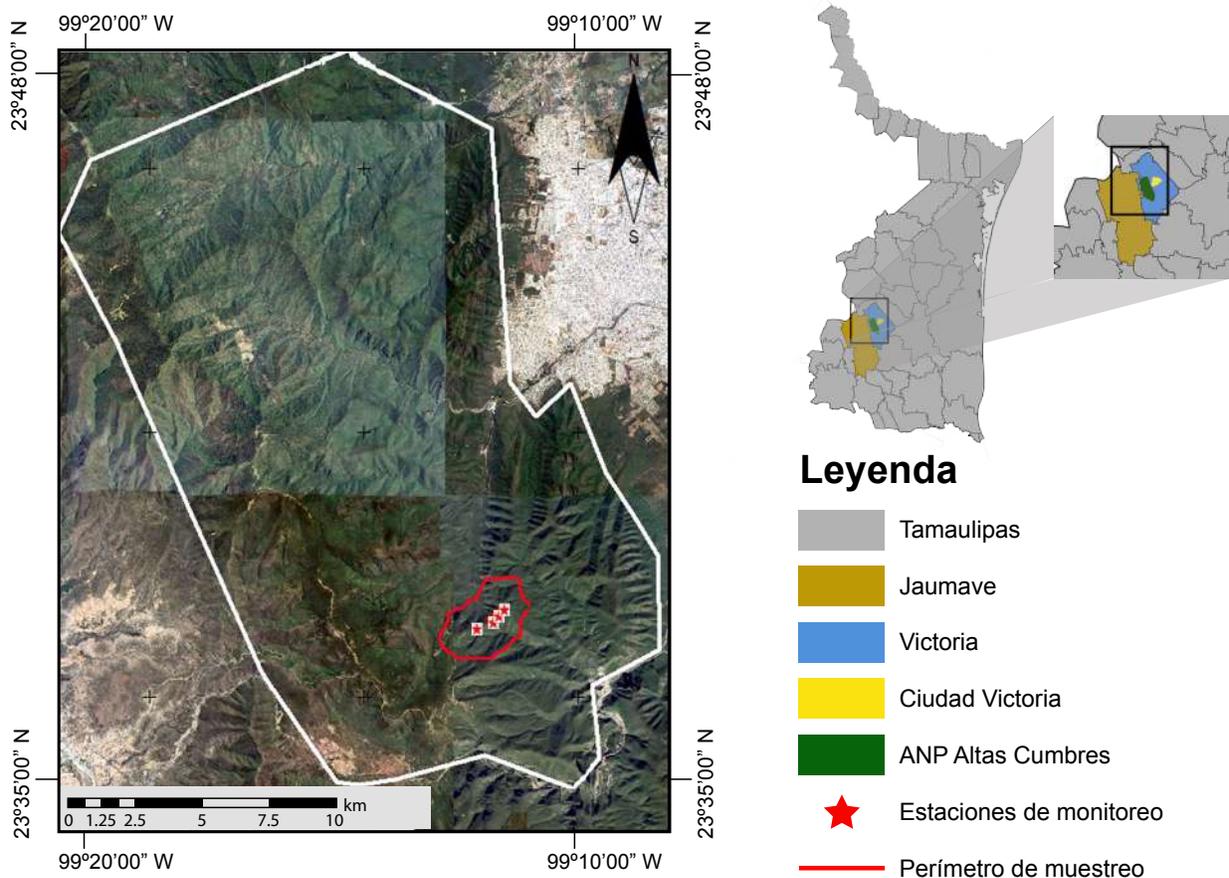
El presente estudio tuvo como objetivo analizar la riqueza, abundancia relativa y adaptaciones ecológicas de los mamíferos medianos y grandes en el bosque de encino del sur del ANP Altas Cumbres.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El ANP Altas Cumbres se localiza en el centro del territorio tamaulipeco, al oeste del municipio de Victoria (prácticamente colindando con la capital del estado), que tiene una población de aproximadamente 349 688 habitantes, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020). Comprende una superficie total de 30 327 -85-62.2 199 m<sup>2</sup>, formando parte de la subprovincia Gran Sierra Plegada, dentro de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, con un relieve complejo que oscila entre los 450 hasta 2 100 msnm (Almaguer-Sierra, 2005). Sus partes más elevadas se ubican al noroeste y las más bajas al este (Gobierno de Tamaulipas/IEA-UAT, 2014).

El área de estudio comprende una comunidad vegetal de bosque de encino con algunos elementos de matorral submontano sobre un gran talud de gravedad o “pedrero” a tan sólo 3.5 km al norte del ejido Altas Cumbres en la porción sur del ANP (Figura 1). El área de muestreo abarcó desde el punto inicial (23°37.725' N, 99°11.921' W) ubicado a 24 m al sur de la Carretera Federal 101 y parador turístico “Cerro Aguajero”, a una altitud de 954 msnm; pasando por una pequeña pendiente que gradualmente se va elevando hasta alcanzar los 1 042 msnm (23°38.157' N, 99°11.366' W), para luego descender nuevamente hasta finalizar en los 792 msnm (23°38.532' N, 99°11.348' W). Se seleccionó esta zona, por observarse que contenía una alta acumulación de restos óseos (craneales y poscraneales) y señales de



■ Figura 1. Área de estudio en el bosque de encino del Área Natural Protegida Altas Cumbres.  
 Figure 1. Study Area of the oak forest in the Altas Cumbres Protected Natural Area.

actividad (heces, huellas, entre otras) de mamíferos de talla mediana y grande. Dichos restos se encontraron dispersos a lo largo de 700 m de extensión.

### Diseño del muestreo

El trabajo de campo se realizó del 2 de septiembre de 2020 al 30 de noviembre de 2021, siguiendo dos métodos de muestreo para mamíferos medianos y grandes. El primer método correspondió a la captura indirecta con la técnica de fototrampeo (Chávez y col., 2013; Medellín y Grisales 2021; MMA/ONU Medio Ambiente/CONAF, 2021). Para la selección de las estaciones de fototrampeo, se buscaron aquellos corredores y senderos que presentarían evidencia del paso de fauna (Aranda y col., 2012). Se establecieron cuatro estaciones de muestreo georreferenciadas simples, cada una equipada con una cámara, excepto la primera estación donde se colocaron dos dispositivos (Figura 1). Las cámaras trampa utilizadas fueron de las marcas Stealthcam (modelo QV18 Trail Camera, Irving, Texas, Estados Unidos); HCO Scoutguard (Modelo SG565F Camera with led flash, Hartington, Nebraska, Estados Unidos) y MixMart (modelo HC-801A/B digital trail camera, China). Estos dispositivos se colocaron sobre troncos de árboles, a una altura entre 43 cm y 48 cm del suelo. La estación I incluía dos cámaras trampa, ubicadas a 3 km al norte del ejido Altas Cumbres, enfocando a un abrevadero artificial para fauna silvestre que está a 992 msnm en el punto de coordenadas 23°37.917' N, 99°11.657' W. A partir de ahí, se establecieron las siguientes estaciones de muestreo, a 300 m de distancia una de la otra, la estación II a 971 msnm, en las coordenadas 23°38.002' N, 99°11.574' W. La estación III a 977 msnm en las coordenadas 23°38.072' N, 99°11.480' W; y la estación IV a 991 msnm en las coordenadas 23°38.157' N, 99°11.366' W. Las cámaras tenían un alcance de 1.5 m a 3.3 m y se configuraron para grabar videos de 10 s y para obtener fotografías. La sensibilidad programada fue de nivel medio y el intervalo entre fotografías fue de 5 s; no se utilizó ningún tipo de cebo. Las cámaras trampa operaron durante todo el tiempo

de muestreo (454 d) y se revisaron trimestralmente (5 revisiones).

El segundo método consistió en la búsqueda de evidencia física de mamíferos (restos óseos, huellas, heces, marcas, animales muertos que conservaran aún la piel y observación directa). Este método es un complemento al del fototrampeo, ya que brinda información importante para el análisis de diversidad, listados taxonómicos y adaptaciones ecológicas, al permitir el registro de especies elusivas a las cámaras trampa. La búsqueda de evidencia física se efectuó haciendo 15 recorridos a lo largo del periodo de muestreo (cada uno de 4 km cada mes). Siendo 4 recorridos por cada estación de muestreo, excepto la estación IV, donde se realizaron sólo 3 recorridos. Las evidencias, como restos óseos (p. ej. cráneos y estructuras poscraneales) fueron identificados taxonómicamente por medio de claves especializadas y comparando estructuras diagnósticas con literatura especializada (Hall, 1981; Thompson, 2021; Lauricella, 2023). En el caso de animales muertos aún con piel, heces, huellas y marcas (e.g. rasguños), se procedió a obtener fotografías y toma de coordenadas geográficas; su identificación taxonómica se basó en bibliografía especializada como Aranda y col. (2012) y Weiler y col. (2023). La observación directa en ocasiones se hizo con ayuda de binoculares (Tasco, 15-16x50, Tailandia), para posteriormente obtener fotografías.

### Análisis fotográfico

Se depuraron las fotografías en las que no se apreciaban correctamente a los individuos. Posteriormente se identificaron a todos los mamíferos utilizando los trabajos de Aranda-Sánchez (2012) y Ceballos (2014) como referencia. Una vez ordenadas las fotografías se siguió la metodología establecida por O'Brien y col. (2003) y Cruz-Bazan y col. (2024) para clasificar las fotos en eventos independientes o consecutivos, con el fin de estimar con mayor precisión la abundancia al evitar contar varias veces al mismo individuo. Se consideran como registros independientes a los si-

guientes casos: 1) fotografías consecutivas de diferentes individuos; 2) fotografías consecutivas de la misma especie separadas por más de 24 h; 3) fotografías no consecutivas de la misma especie (Lira-Torres y Briones-Salas, 2011; Monroy-Vilchis y col., 2011).

### Riqueza específica

Se utilizó el método basado en la cuantificación del número de especies presentes, consistente en el conteo del número de especies del sitio, creando así un listado taxonómico a nivel específico. Esta enumeración de especies es una base simple, pero sólida, para apoyar el concepto teórico de diversidad (Moreno, 2001).

Para la creación del listado sólo se tomaron en cuenta a los mamíferos terrestres y arbóricolas no voladoras, con un peso entre 1 kg a 20 kg para los de talla mediana y superior a los 20 kg para los de talla grande (Benchamol, 2016). El listado incluyó tanto a especies nativas como introducidas (de origen doméstico) (e.g. caballos, burros, cabras, vacas, ovejas, gatos y perros) que pudieran o no formar poblaciones asilvestradas (ferales). La lista se ordenó utilizando la taxonomía de Mammal Diversity Database (2022).

### Índice de abundancia relativa (IAR)

Se empleó el software de RStudio (R Core Team, 2017) versión 4.3.1. y la fórmula propuesta por Mandujano (2019):

$$IAR = C/EM * 100$$

Donde:

C = Capturas o eventos fotografiados

EM = Esfuerzo de muestreo (No. de cámaras) \* (días de monitoreo) estacional o total

100 = factor que se emplea comúnmente para interpretar el índice como número promedio de fotos por cámara cada 100 d

### Estructura de comunidades (análisis de las adaptaciones ecológicas)

Se determinó la estructura y organización de las comunidades mediante el análisis e iden-

tificación de los nichos ecológicos de los mamíferos medianos y grandes (Andrews, 1996). Se define el nicho ecológico mediante 4 nichos o adaptaciones ecológicas distintas:

a) Categorías tróficas. Las especies se agruparon de acuerdo con el tipo de alimentación conocida para cada una. Se consideraron las siguientes categorías: omnívoro, herbívoro, frugívoro, insectívoro y carnívoro (Ceballos y Oliiva, 2005).

b) Categorías de locomoción. Incluye 5 variables de adaptación del aparato locomotor: % arbóreas, % trepadoras o escansorial, % excavadoras o semifosorial, % grandes mamíferos > 10 kg (sin ninguna locomoción particular) y % pequeños mamíferos < 10 kg (sin ninguna locomoción particular).

c) Categorías taxonómicas: se agruparon según los órdenes taxonómicos: mamíferos a Carnívora, Artiodactyla, Perissodactyla, Didelphimorphia, Cingulata, Lagomorpha.

La diversidad de dieta y masa corporal ejercen una gran influencia en la medida de la diversidad de la fauna. Estas variaciones no son independientes de la filogenia. La mayoría de las variaciones en los rasgos ecológicos ocurre en los niveles taxonómicos mayores. Por lo tanto, se hizo una combinación de estas tres categorías. La relación que existe entre las diferentes características son a la vez una muestra de la importancia que tiene en considerarlas si se quiere conservar la biodiversidad y en su efecto para conservar (Frisch, 1995).

Las representaciones de las adaptaciones ecológicas se realizaron mediante las gráficas bivariadas obtenidas del programa PAST 4.11 (Paleontological Statistics) (Hammer y col., 2001) y tablas comparativas.

## RESULTADOS

El esfuerzo de muestreo de 2 270 d/trampas (54 480 h continuas) y 60 km recorridos (esfuerzo de captura), para el bosque de encino de la porción sur de Altas Cumbres, permitió obtener 336 eventos independientes (Tabla 1).

■ **Tabla 1. Lista de mamíferos medianos y grandes del bosque de encino del Área Natural Protegida Altas Cumbres.**

Table 1. List of medium and large mammals of the oak forest of the Altas Cumbres Protected Natural Area.

Categorías taxonómicas	IAR	Categoría trófica	Locomoción	Peso (kg)	RF	REF	NOM -059
<b>Carnívora Bowdich, 1821</b>							
<b>Canidae Fischer de Waldheim, 1817</b>							
<i>Urocyon cinereoargenteus</i> Schreber, 1775	0.27	Omnívoro	Escansorial	1.5 a 5	17	T(2), H(5)	-
* <i>Canis familiaris</i> Linnaeus, 1758	0.54	Carnívoro	Cursorial > 10 kg	6 a 38	34	OD(12), O(1)	-
<b>Ursidae Fischer de Waldheim, 1817</b>							
<i>Ursus americanus</i> Pallas, 1780	0.19	Omnívoro	Escansorial	45 a 50	12	T(1), M(1)	Pr
<b>Procyonidae Gray, 1825</b>							
<i>Bassariscus astutus</i> Lichtenstein, 1830	0.09	Omnívoro	Escansorial	0.7 a 1.5	5	-	-
<i>Nasua narica</i> Linnaeus, 1766	0.05	Omnívoro	Escansorial	4.1 a 5.4	3	OD (3)	-
<b>Mephitidae Bonaparte, 1845</b>							
<i>Conepatus leuconotus</i> Lichtenstein, 1832	0.11	Insectívoro	Semifosorial	1.5 a 2.7	6	-	-
<b>Felidae Fischer de Waldheim, 1817</b>							
<i>Panthera onca</i> Linnaeus, 1758	0.03	Carnívoro	Escansorial	35 a 80	2	-	P
<i>Puma concolor</i> Linnaeus, 1771	0.27	Carnívoro	Escansorial	30 a 100	17	O(1)	-
<i>Leopardus pardalis</i> Linnaeus, 1758	0.19	Carnívoro	Escansorial	7.8 a 14	11	-	P
<i>Leopardus wiedii</i> Schinz, 1821	0.03	Carnívoro	Arbóreo	3 a 7	2	-	P
<i>Herpailurus yagouaroundi</i> E.Geoffroy Saint-Hilaire, 1803	0.03	Carnívoro	Escansorial	3 a 9	2	-	A
* <i>Felis catus</i> Schreber, 1775	0.05	Carnívoro	Escansorial	4 a 5	3	OD (2), O(1)	-
<b>Artiodactyla Owen, 1848</b>							
<b>Tayassuidae Palmer, 1897</b>							
<i>Dicotyles tajacu</i> Linnaeus, 1758	1.06	Herbívoro	Cursorial >10kg	15 a 30	66	OD(2), O(2)	-
* <i>Sus scrofa</i> Linnaeus, 1758	0.02	Omnívoro	Cursorial >10kg	73 a 125	1	-	-
<b>Cervidae Goldfuss, 1820</b>							
<i>Odocoileus virginianus</i> Zimmermann, 1780	0.54	Herbívoro	Cursorial >10kg	25 a 100	34	OD(2)	-
<i>Mazama temama</i> Kerr, 1792	0.08	Herbívoro	Cursorial >10kg	10 a 25	5	-	-
<b>Bovidae Gray, 1821</b>							
* <i>Capra hircus</i> Linnaeus, 1758	0.03	Herbívoro	Cursorial >10kg	19.5 a 62.6	2	OD (2), H(1)	-
* <i>Bos taurus</i> Linnaeus, 1758	0.05	Herbívoro	Cursorial >10kg	160 a 250	3	OD (1), H(2)	-

Continúa...

Perissodactyla Owen, 1848							
Equidae Gray, 1821							
* <i>Equus caballus</i> Linnaeus, 1758	0.05	Herbívoro	Cursorial >10 kg	200 a 250	3	OD (2), H(2), O(1)	-
* <i>Equus africanus</i> Linnaeus, 1758	0.03	Herbívoro	Cursorial >10 kg	100 a 200	2	OD(1)	-
Didelphimorphia Gill, 1872							
Didelphidae Gray, 1821							
<i>Didelphis virginiana</i> Allen, 1900	0.02	Omnívoro	Arbóreo	1a 6	1	P(1)	-
Cingulata Illiger, 1811							
Dasypodidae Gray, 1821							
<i>Dasypus novemcinctus</i> Linnaeus, 1758	0.03	Insectívoro	Semifosorial	4 a 8	2	-	-
Lagomorpha Brandt, 1855							
Leporidae Fischer de Waldheim, 1817							
<i>Sylvilagus floridanus</i> Allen, 1890	1.67	Herbívoro	Saltatorial	1	103	OD (4), H(3), P(1)	

IAR = índice de Abundancia Relativa. \* = especies domésticas. RF = registro fotográfico. REF = registro de evidencia física: OD = observación directa, O = óseo, H = heces, T = huellas, P = piel y M = marcas. Se contempla el estado de conservación de acuerdo con SEMARNAT (2019; modificación del anexo normativo III de la NOM-059-SEMARNAT-2010): A = amenazada; P = peligro de extinción y Pr = sujeta a protección especial.

En total, se reconoce una riqueza de 23 especies (16 de origen nativo), pertenecientes a 6 órdenes, 12 familias, 21 géneros.

Entre las especies nativas registradas, destaca la presencia de 5 de los 6 felinos que se distribuyen en México: jaguar (*Panthera onca*), puma (*Puma concolor*), ocelote (*Leopardus pardalis*), margay (*Leopardus wiedii*) y el yaguarundi (*Herpailurus yagouaroundi*). También sobresale el registro del cérvido temazate rojo (*Mazama temama*), debido a que representa, actualmente, la ubicación de la especie en la latitud más al norte (Hernández-Jasso y col., 2024). El orden con mayor número de especies fue Carnívora, con 12 taxones (52.17 %), incluyendo a 10 especies nativas y 2 introducidas de origen doméstico. Otro orden bien representado fue Artiodactyla, con 6 taxones (26.09 %), 3 especies nativas y 3 domésticas. Perissodactyla presentó 2 taxones (8.69 %), ambas especies domésticas.

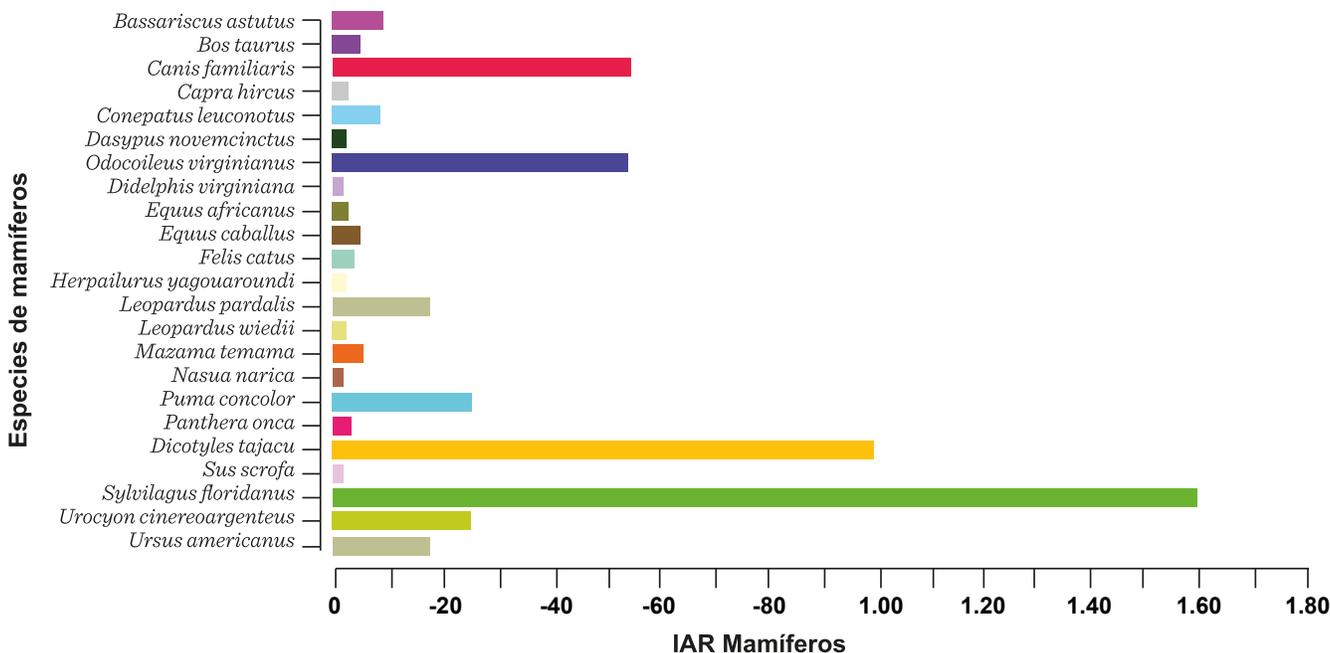
Cingulata, Didelphimorphia y Lagomorpha estuvieron representadas por 1 especie (4.35 %) cada una, las cuales eran nativas (Tabla 1).

### Índice de abundancia relativa (IAR)

El IAR más bajo lo obtuvieron 2 taxones (n = 1, IAR 0.02), de los cuales uno era de origen nativo, la zarigüeya común (*Didelphis virginiana*) y el otro no nativo, el cerdo común (*Sus scrofa*) (Figura 2). En contraste, 2 especies nativas presentaron el IAR más alto, el conejo serrano (*Sylvilagus floridanus*) (n = 103, IAR 1.67) y el pecarí de collar (*Dicotyles tajacu*) (n = 66, IAR 1.06). En ambos casos fueron documentados por fototrampeo y evidencia física. Mientras que los carnívoros nativos con más alto IAR fueron, la zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*) (n = 17, IAR 0.27) y el puma (*Puma concolor*) (n = 17, IAR 0.27). Sin embargo, el perro común (*Canis familiaris*) fue el taxón más abundante de las especies no nativas (n = 34, IAR 0.54) (Tabla 1).

Los resultados de las adaptaciones ecológicas de los 23 mamíferos registrados en el bosque de encino (Tabla 2) indicaron que, la categoría trófica mayor representada fue la de herbívoros (34.79 %), seguida de carnívoros (30.43 %) y omnívoros (26.09 %). El menos abundante fue insectívoro (8.69 %). En el caso de la categoría de locomoción, las más re-

presentativas fueron los mamíferos escansoriales y los que tienen una locomoción terrestre superior a los 10 kg, cada una representando el 39.13 %. Mientras que, los mamíferos de locomoción arbórea y semifosorial constituyeron el 8.69 %. Finalmente, la locomoción saltatorial fue la menos abundante, ocupando el 4.35 %.



■ Figura 2. Índice de Abundancia Relativa de los mamíferos medianos y grandes del bosque de encino del Área Natural Protegida Altas Cumbres.

Figure 2. Relative abundance index of medium and large-sized mammals of the oak forest in the Altas Cumbres Protected Natural Area.

■ Tabla 2. Lista de adaptaciones ecológicas de los mamíferos medianos y grandes del bosque de encino del Área Natural Protegida Altas Cumbres: categorías de locomoción y tróficas.

Table 2. List of ecological adaptations of medium and large sized mammals of the oak forest of the Altas Cumbres Protected Natural Area: locomotion and trophic categories.

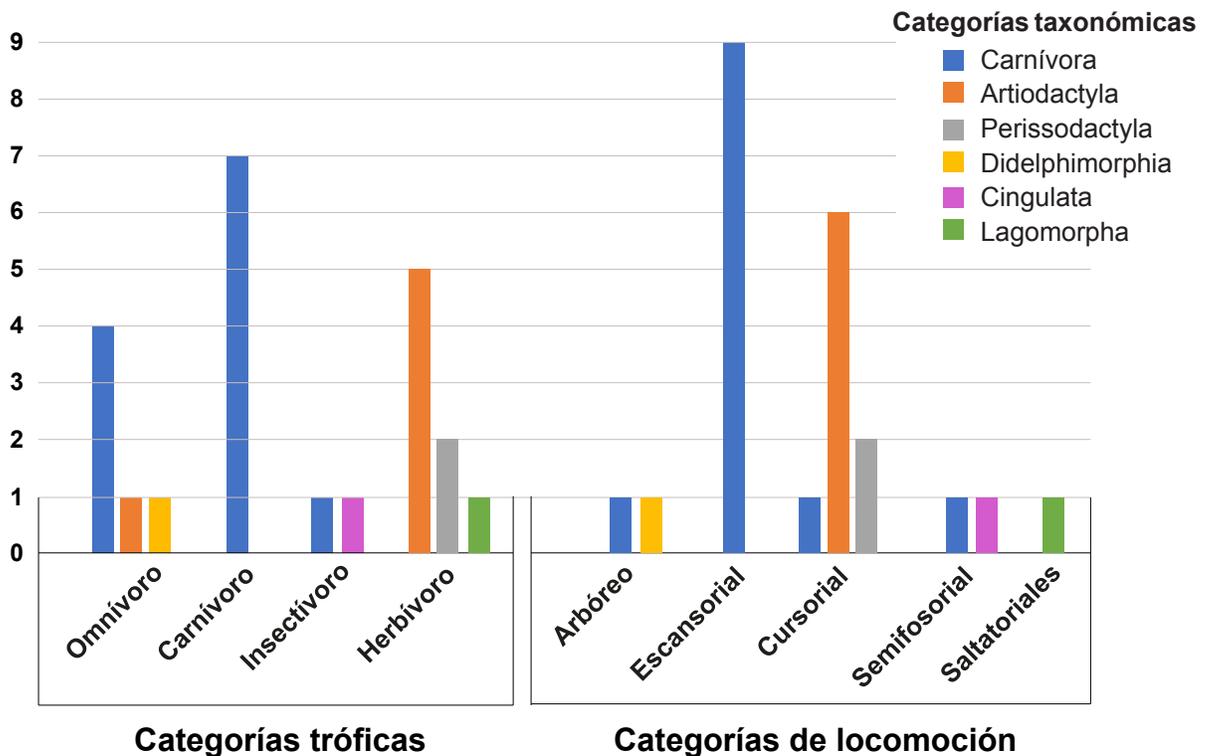
Categoría locomotora	Categoría trófica				Total
	Herbívora	Carnívora	Omnívora	Insectívora	
Escansorial	-	5	4	-	9
Cursorial > 10 kg	7	1	1	-	9
Arbóreo	-	1	1	-	2
Semifosorial	-	-	-	2	2
Saltatorial	1	-	-	-	1
Total	8	7	6	2	23

Al agrupar los registros taxonómicos (órdenes) se obtuvieron 6 grupos (Figura 3). Carnívora agrupó 12 especies, de las cuales 7 son carnívoras, 4 omnívoras y sólo 1 especie es insectívora. De esta misma, se encuentran 9 taxones con capacidades escansoriales. El resto de las capacidades locomotoras son representadas por una sola especie: cursorial > 10 kg (*C. familiaris*); semifosorial (*C. leuconotus*); y arbóreo (*L. wiedii*). Artiodactyla fue el segundo grupo mejor representado, con 6 especies: 5 herbívoras y 1 omnívora. Todos con locomoción cursorial (> 10 kg). El tercer grupo fue Perissodactyla, integrado por 2 especies de la misma categoría trófica (herbívora), ambas siendo cursoriales (> 10 kg). Mientras que los grupos Didelphimorphia, Cingulata y Lagomorpha, estuvieron representados por solo 1 especie, todas con una categoría trófica y de locomoción distinta: Didelphimorphia (omnívora y arbórea), Cingulata (in-

sectívora y semifosorial) y Lagomorpha (herbívora y saltatorial).

### DISCUSIÓN

Los métodos no invasivos como colecta de evidencias físicas de mamíferos (restos óseos, huellas, heces, marcas y observación directa) en conjunto con el fototrampeo demostraron ser efectivos para el análisis de la diversidad biológica (Tabla 3), en términos de la riqueza de especies y su abundancia relativa del bosque de encino del ANP Altas Cumbres. El fototrampeo es la técnica más eficiente para estimar la riqueza, en comparación con otros métodos, tal como lo sugieren los trabajos de Botello y col. (2008), Andrade-Ponce y col. (2021), Ríos-Solís y col. (2021) y Zagal-García y col. (2022). Sin embargo, cuando no se cuenta con el equipo de monitoreo (fototrampeo) suficiente se puede implementar la combinación con otras técnicas con eficiencia para



■ Figura 3. Categorías tróficas y de locomoción en las categorías taxonómicas (órdenes) de mamíferos medianos y grandes del bosque de encino del ANP Altas Cumbres.  
 Figure 3. Trophic and locomotion categories in the taxonomic categories (orders) of medium and large-size mammals of the oak forest in the Altas Cumbres Protected Natural Area.

■ **Tabla 3.** Comparativa de registros de mamíferos medianos y grandes (órdenes) del bosque de encino del Área Natural Protegida Altas Cumbres mediante los métodos de fototrampeo y del registro de evidencia física.

Table 3. Comparison of records of medium and large mammals (orders) from the oak forest of the Altas Cumbres Protected Natural Area using camera trapping methods and records of physical evidence.

Forma de avistamiento	Órdenes						Total
	Carnívora	Artiodactyla	Perissodactyla	Didelphimorphia	Cingulata	Lagomorpha	
Fototrampeo	114	111	5	1	2	103	336
Observación directa	17	7	3	0	0	4	31
Restos óseos	3	2	1	0	0	0	6
Animales muertos	0	0	0	1	0	1	2
Heces	5	3	2	0	0	3	13
Huellas	3	2	0	0	0	0	5
Marcas	1	0	0	0	0	0	1
Total	29	14	5	1	0	8	57

obtener una estimación de la diversidad biológica más robusta, tal como se observa en los trabajos de Lyra-Jorge y col. (2008), Aranda-Sánchez (2012), Acevedo-Quintero y Zamora-Abrego (2021).

De las 19 especies de medianos y grandes mamíferos reportadas en el Programa de Manejo de ZESCE Altas Cumbres elaborado por el Gobierno de Tamaulipas/IEA-UAT (2014), el presente estudio registró por medio de los métodos de fototrampeo y de evidencia física, un total de 16 especies nativas para el bosque de encino. Entre estas especies, destacan la presencia de *Leopardus wiedii* y de *Mazama temama*, que no habían sido reportadas en el programa de manejo (Hernández-Jasso y col., 2024). Esta cifra equivale al 84.21 % de la riqueza de mamíferos medianos y grandes de toda el ANP, estando ausente en los registros 3 especies: *Canis latrans* (coyote), *Lynx rufus* (lince rojo o gato montés) y *Spilogalis putorius* (zorrillo manchado). La ausencia de *C. latrans* en el registro del bosque de encino, debe tomarse con cautela, ya que Wong-Smer y col. (2022), reportaron su presencia en esa misma vegeta-

ción del ANP de Altas Cumbres, pero con poca abundancia. En el caso del gato montés, tienen una preferencia de hábitat asociada a bosques templados y matorrales áridos (Anderson y Lovallo, 2003), por lo que su ausencia podría estar asociada de forma negativa con la alta abundancia de otros grandes depredadores como el puma (Persson, 1985; Palomares y Caro, 1999) y perros ferales (López-González y col., 2015), debido a la competencia por el alimento. Mientras que el zorrillo manchado no se registró debido a que, puede entrar también en competencia con otros mesocarnívoros, o simplemente su habilidad como escalador, no permitió ser detectado por los métodos de registro (Rosatte y Larivière, 2003).

Esta elevada diversidad de mamíferos del bosque de encino es congruente con los resultados de otros estudios semejantes en bosques templados y semihúmedos. Registrando una riqueza de especies parecidas a otras localidades del país como selva alta perennifolia del Sitio Experimental “Las Margaritas” en Puebla, con 16 especies de medianos y grandes mamíferos (Ordóñez-Prado y col., 2023);

el bosque mesofilo de montaña de la Reserva de la Biosfera “El Cielo”, Tamaulipas, que registra entre 16 y 18 especies según la estación (Ochoa-Espinoza y col., 2023); el bosque de pino de la Reserva de la Biosfera “La Michilia”, Durango, con 16 especies nativas y 9 no nativas (Rawlinson-Marín, 2024), y la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda Guanajuato, México, con 16 especies (Charre-Medellín y col., 2016). Aunque, es superior a los bosques de encino-pino de la Reserva de la Biosfera “El Cielo”, que registra 10 especies (Vargas-Contreras y Hernández-Huerta, 2001); de la Tierra de los Agustinos, Guanajuato, con 15 especies (Cortés-Gutiérrez y col., 2019) y las comunidades del Rincón y Peña de Lobos, municipio de Santa Ana Jilotzingo, Estado de México, con 10 especies (Escamilla-Ramírez y col., 2020).

El orden Carnívora es el único grupo taxonómico que cuenta bajo algún tipo de protección especial. Registra 5 especies distribuidas de 2 familias bajo esta protección. La primera es la familia Felidae, que cuenta con 5 de las 6 especies registradas en el país, estando 4 de ellas bajo alguna protección: 3 en peligro de extinción y 1 amenazada (Ceballos y col., 2010; SEMARNAT, 2019). La segunda, es la familia Ursidae, que presenta una especie bajo protección especial.

Los resultados de este estudio indican que la riqueza de especies de mamíferos medianos y grandes no es afectada por el impacto de las actividades antrópicas. Esto se sustenta en que otros estudios han reportado que los mamíferos medianos y grandes pueden ser resilientes a las actividades humanas (Vázquez y Gastón, 2006); como los registrados en el bosque de pino-encino de la sierra de Oaxaca (Cruz-Espinoza y col., 2012; Hernández-Rodríguez y col., 2019); el campus de la Universidad Nacional de Colombia sede de La Paz, Colombia (Azevedo-Ramos y col., 2006). Sin embargo, existen otros indicadores que revelan lo contrario. Por un lado, se registraron bajos IAR en varias especies nativas. Este bajo índice puede estar relacionado con

diversos factores. En felinos como *Herpailurus yagouaroundi*, *Leopardus wiedii* y *Panthera onca*, puede deberse a su conducta sigilosa, que puede resultar que su registro sea poco frecuente (Gittleman y col., 2001), y si a esto se adiciona que la densidad de sus poblaciones a veces tiende a disminuir debido a la persecución que viene derivada de la hostilidad de la gente (Weber y Rabinowitz 1996; Sanderson y col., 2002). El bajo índice de *Didelphis virginiana*, *Nasua narica* y *Dasyurus novemcinctus*, podría estar relacionado a la pérdida de su hábitat o cambio de paisaje (Cruz-Salazar y col., 2014; 2016; Mezhua-Velázquez y col., 2022). Aunque podría también influir en que el fototrampeo no es una técnica adecuada para analizar su abundancia, según Monroy-Vilchis y col. (2011), Cortés-Marcial y Briones-Salas (2014).

En el bosque de encino analizado, se registraron 7 especies de mamíferos de origen doméstico, que no habían sido documentadas en el Programa de Manejo de ZESCE Altas Cumbres, ya que este se enfocó exclusivamente en fauna silvestre (Gobierno de Tamaulipas/IEA-UAT, 2014). Este alto número de especies domésticas equivalen al 30.44 % del total de la riqueza de mamíferos medianos y grandes del bosque de encino. La presencia de dicha fauna podría llegar a afectar en un futuro a ciertos mamíferos nativos. Particularmente, los carnívoros ferales como perros y gatos, pueden llegar a ser problemáticos, ya que estos entran en competencia y depredan a ciertas especies autóctonas. Un ejemplo de ello, lo documenta Hortelano-Moncada y col. (2024), en la Reserva Ecológica Urbana en la Ciudad de México. En ese estudio, los perros y gatos ferales llegaron a consumir mamíferos medianos como *Didelphis virginiana*, *Sylvilagus floridanus*, *Bassariscus astutus* y *Spilogale* sp. Otro problema está en la presencia artiodáctilos de origen doméstico como los cerdos y bóvidos, que, aunque su abundancia relativa fue muy baja respecto a la mayoría de los herbívoros nativos, pueden en un futuro llegar a transformar el hábitat, además, de ser portadoras de enfer-

medades (Pyšek y col., 2020; Vargas-Contreras y col., 2023; Rendón-Hernández y col., 2024).

Es probable que las especies nativas del orden Carnívora sean las más afectadas por la presencia de *Felis catus* y *Canis familiaris*. Pues ambas especies suelen entrar en competencia directa con los hipercarnívoros y mesocarnívoros nativos, debido a que su dieta es generalista, con una variada gama de presas en el entorno: pequeños y medianos mamíferos, aves, anfibios, reptiles, e insectos, de acuerdo al Departamento de Medio Ambiente, Agua, Patrimonio y Artes (DEWHA, por sus siglas en inglés: Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts) (DEWHA, 2008). Los perros y gatos han sido introducidos por las comunidades humanas asentadas en los alrededores del ANP Altas Cumbres. Estos asentamientos se han venido incrementado en los últimos años con el desarrollo del ecoturismo en la región, lo que ha conllevado a un mayor aumento de las poblaciones de ambas especies con probable comportamiento feral. Si bien, es cierto que los grandes félidos como *Puma concolor* y *Panthera onca* pueden llegar a depredar a los perros ferales, el índice de abundancia relativa de estos es de 0.54. Dicha cifra es casi dos veces superior a la del puma, considerado como el carnívoro nativo con mayor IAR del análisis. Por lo que es importante que se realicen en un futuro estudios más especializados, que permitan saber la dieta de estos perros ferales, tal como se hizo en la Reserva Ecológica Urbana de Ciudad de México por Hortelano-Moncada y col. (2024).

En general, las especies nativas del orden Carnívora mostraron un IAR de moderado a bajo en relación a otros grupos taxonómicos como Artiodactyla y Lagomorpha. Siendo las especies *Urocyon cinereoargenteus*, *Puma concolor*, *Leopardus pardalis* y *Ursus americanus* las que mostraron los valores más altos (0.27, 0.27, 0.19 y 0.19, respectivamente). Lo cual es congruente con el hecho de que las estaciones de monitoreo en este estudio fueron ubicadas en brechas utilizadas por car-

nívoros. Algunas de ellas con abundantes señales de tránsito (huellas) y consumo de alimento (restos óseos y heces) dejadas principalmente por félidos y cánidos. Por un lado, *U. cinereoargenteus* es un cánido que se adapta bien a sitios perturbados y se caracteriza por ser una especie generalista - oportunista que consume presas de fácil acceso (Castellanos y col., 2009; Wong-Smer y col., 2022). Aunque llama la atención que, en el análisis, todos los registros de *U. cinereoargenteus* se dieron en una sola estación de muestreo. Su registro restringido podría explicarse *a priori* que, sólo en este lugar abundaban las semillas de la palma *Brahea berlandieri*, consideradas como su principal alimento en Altas Cumbres, de acuerdo a Wong-Smer y col. (2022). Otra explicación es que *U. cinereoargenteus* esté evitando tener una relación negativa con otros meso y grandes carnívoros. Pues esta estación de muestreo careció de registros de otros cánidos, grandes félidos y úrsidos. Por otro lado, *P. concolor* es uno de los depredadores alfa en la mayoría de los ecosistemas donde se distribuye, debido a que regula la densidad poblacional de sus presas y competidores intragremiales (Ripple y col., 2014; Soria-Díaz y col., 2017). Asimismo, por su posición en la cima de la pirámide trófica, este depredador es naturalmente poco abundante. Sin embargo, en el análisis se registraron en tres estaciones de muestreo, y su IAR fue más elevado en relación al de otros carnívoros nativos. Esta cifra, a pesar de parecer cuantiosa, es inferior a la obtenida en otros estudios de puma en México, como en la selva Lacandona, en Chiapas, con IAR de 6.62 en temporada de lluvias y 5.7 en la seca (Azua, 2005; Azua y Medellín, 2007); en la Sierra Nanchititla, Estado de México con IAR de 1.7 (Monroy-Vilches y col., 2011); en el bosque mesófilo de montaña de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima, con 19.16 (Aranda y col., 2012); y en la selva de los Chimalapas, con 2.77 (Briones-Salas, 2016).

Los únicos taxones que tuvieron un IAR alto fueron *D. tajacu*, *O. virginianus* y *S. florida-*

*nus*. Es probable que el *D. tajacu* sea más tolerante a la presencia humana aunado a su estilo de vida gregario, que le permite moverse ampliamente y poder defenderse en grupo ante posibles ataques de depredadores (Briceño-Méndez y col., 2017; Falconi-Briones y col., 2022). Por otro lado, el venado cola blanca es un ungulado con una alta capacidad de adaptabilidad a ambientes particularmente fragmentados, como zonas ganaderas, agrícolas y en los alrededores de poblados de tamaño regular (Galindo-Leal y Weber 1998; Gallina y col., 2010); su amplia variedad de alimentación posiblemente le permita no entrar en competencia con los herbívoros introducidos como los caballos, asnos, cabras y cerdos. Por último, el conejo serrano tiene una alta plasticidad para usar ambientes con alto o bajo nivel de perturbación sin que sufra efectos importantes (Clavijo-Gutiérrez, 2007; Chávez-García y col., 2022). El bajo IAR de depredadores en esta región podría también influir en su elevado IAR.

La riqueza de mamíferos encontrada es similar o superior a la de otras ANP del país. Lo que *a priori* podría estar indicando buen estado de conservación de Altas Cumbres. Estos mamíferos registraron una locomoción mayoritariamente del tipo escansorial y cursorial, principalmente presentes en los órdenes Carnívora y Artiodactyla. Dichas adaptaciones ecológicas son más similares a las presentes en las comunidades de mamíferos de bosque tropicales deciduos que las presentes en bosques templados caducifolios, de acuerdo a la tipología de la vegetación de Walter (1970) (Hernández-Jasso, 2015); a pesar que a los bosques de encino en México se les considera de un clima templado y semihúmedo, con una composición florística que mezcla elementos neotropicales y holárticos (porcentajes más o menos equivalentes) (Rzedowski, 1981). Este estudio también documentó la presencia de especies de origen doméstico, siendo la abundancia relativa muy alta en el caso del perro (que frecuentemente adquiere comportamiento feral), más que en la mayoría de las especies nativas.

## CONCLUSIONES

El bosque de encino del ANP Altas Cumbres registró una riqueza de mamíferos nativos alta, con 16 especies de mamíferos medianos y grandes, entre ellos, 2 especies que no se habían documentado en el Programa de Manejo de ZESCE Altas Cumbres. Sin embargo, no se registraron tres especies enlistadas en el dicho programa. Su ausencia podría explicarse debido a que tienen preferencia de hábitat diferente o que son poco abundantes en el bosque de encino. Por lo cual esta cifra podría decrecer si se realizan futuros estudios más extensos en nuevas áreas de muestreo del bosque. Aunque se puede asumir que existe un buen estado de conservación del ANP, existen ciertas señales que deben encender los primeros focos de alarma. Entre ellas, la abundancia relativa baja de especies nativas de mamíferos medianos, como *Nasua narica* y *Didelphis virginiana*, pues su disminución en bosques templados es comúnmente atribuida a la reducción de su hábitat. También destaca la presencia de especies de mamíferos introducidos que, aunque su riqueza fue muy inferior al de las nativas, en el caso del perro su abundancia fue muy alta, incluso duplicando el valor de los carnívoros nativos con el IAR más alto. Es conveniente continuar con el monitoreo a largo plazo de los mamíferos medianos y grandes, no sólo del bosque de encino, sino de toda el ANP Altas Cumbres.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Tecnológico Nacional de México Campus Victoria por brindarnos el apoyo de sus instalaciones. A Benigno Gómez, Alfonso Terán y José Mendoza, por su contribución en la logística y apoyo de equipo.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

## REFERENCIAS

- Acevedo-Quintero, J. F. y Zamora-Abrego, J. G. (2021). Inventario de mamíferos asociados al campus universitario de la Universidad Nacional de Colombia-Sede de La Paz, Cesar. *Notas de Mastozoología*, 7(2), 298. <https://doi.org/10.47603/mano.v7n2.298>
- Ahumada, J. A., Silva, C. E., Gajapersad, K., Hallam, C., Hurtado, J., Martin, E., & Sheil, D. (2011). Community structure and diversity of tropical forest mammals: data from a global camera trap network. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1578), 2703-2711. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0115>.
- Almaguer-Sierra, P. (2005). Fisiografía del estado de Tamaulipas. En L. Barrientos, S. Correa, J. Horta y J. García (Eds.), *Biodiversidad Tamaulipeca* (pp. 2-20). Dirección General de Educación Superior Tecnológica- Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria.
- Anderson, E. M. & Lovallo, M. J. (2003). Bobcat and Lynx. In G. A. Feldhamer, B. C. Thompson, & J. A. Chapman (Eds.), *Wild Mammals of North America: Biology, Management, and conservation*, (Second edition, pp. 758-786). Johns Hopkins University Press.
- Andrade-Ponce, G. P., Cepeda-Duque, J. C., Mandujano, S., Velásquez-C, K. L., Gómez-Valencia, B. y Lizcano, D. J. (2021). Modelos de ocupación para datos de cámaras trampa: de los conceptos a la interpretación. *Mammalogy Notes*, 7(1), 1-26. <https://doi.org/10.47603/mano.v7n1.200>.
- Andrews, P. (1996). Palaeoecology and hominoid paleoenvironments. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 71, 257-300.
- Aranda, M., Botello, F. y López-de Buen, L. (2012). Diversidad y datos reproductivos de mamíferos medianos y grandes en el bosque mesófilo de montaña de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83, 778-784, 2012. DOI:10.7550/rmb.24850.
- Aranda-Sánchez, J. M. (2012). Manual para el rastreo de mamíferos silvestres de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Azevedo-Ramos, C., Carvalho-De-Carvalho, O., & Benedito, D. A. (2006). Short-term effects of reduced-impact logging on eastern Amazon fauna. *Forest Ecology and Management*, 232, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.025>.
- Azuara, D. y Medellín, R. (2007). Fototrampeo como herramienta para el estudio del jaguar y otros mamíferos en la Selva Lacandona, Chiapas. En G. Ceballos, C. Chávez, R. List y H. Zarza, (Eds.). *Conservación y Manejo del Jaguar en México: Estudios de Caso y Perspectivas* (pp. 143-153). CONABIO-Alianza WWF/TelcelUniversidad Nacional Autónoma de México.
- Azuara, S. D. (2005). Estimación de abundancia de mamíferos terrestres en un área de la Selva Lacandona, Chiapas. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional UNAM. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000347384>. Fecha de consulta: 19 de noviembre de 2023.
- Baillie, J. E., Collen, B., Amin, R., Akcakaya, H. R., Butchart, S. H., Brummitt, N., & Mace, G. M. (2008). Toward monitoring global biodiversity. *Conservation Letters*, 1(1), 18-26. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2008.00009.x>.
- Benchimol, M. (2016). Medium and large -Sized mammals. In T. H. Larsen (Ed.), *Core standard methods for rapid biological field assessment* (pp. 37-48). Conservation international.
- Botello, F., Sánchez-Cordero, V. y González, G. (2008). Diversidad de carnívoros en Santa Catarina Ixtepeji, Sierra Madre de Oaxaca, México. En E. Lorenzo, E. Espinosa y J. Ortega (Eds.), *Avances en el estudio de los mamíferos de México* (Vol. 2, pp. 335-354). Asociación Mexicana de Mastozoología, AC.
- Briceño-Méndez, M., Naranjo, E. J., Altrichter, M., & Mandujano, S. (2017). Availability of two species of fruits and their influence on the social structure of *Tayassu pecari* and *Dicotyles tajacu*. *Therya*, 8(3), 193-198. <https://doi.org/10.12933/therya-17-450> ISSN 2007-3364.
- Briones-Salas, M., Lira-Torres, I., Carrera-Treviño, R. y Sánchez-Rojas, G. (2016). Abundancia relativa y patrones de actividad de los felinos silvestres en la selva de los Chimalapas, Oaxaca, México. *Therya*, 7(1), 123-134
- Caballero-Rico, F. C. (2019). Estado del conocimiento generado sobre las Áreas Naturales Protegidas de Tamaulipas. Colofón.
- Castellanos, M. G., García, P. N. y List, R. (2009). *Ecología del cacomixtle (Bassariscus astutus) y la zorra gris (Urocyon cinereoargenteus)*. Instituto de ecología. Universidad Autónoma de México. [En lí-

nea]. Disponible en: [http://www.repsa.unam.mx/documentos/CastellanosMorales\\_et\\_al\\_2009\\_Zorra\\_y\\_cacomixtle.pdf](http://www.repsa.unam.mx/documentos/CastellanosMorales_et_al_2009_Zorra_y_cacomixtle.pdf). Fecha de consulta: 10 de agosto de 2023.

Ceballos, G. (2014). *Mammals of Mexico*. Ed. Johns Hopkins University Press.

Ceballos, G., List, R., Medellín, R., Bonacic, C. y Pacheco, J. (2010). *Los felinos de América. Cazadores sorprendentes*. México: TELMEX.

Ceballos, G. y Oliva, G. (2005). *Mamíferos silvestres de México*. CONABIO-Fondo de Cultura Económica.

Charre-Medellín, J. F., Magaña-Cota, G., Monte-rubio-Rico, T. C., Tafolla-Muñoz, R., Charre-Luna, J. L. y Botello, F. (2016). Mamíferos medianos y grandes del municipio de Victoria, Reserva de la Biosfera Sierra Gorda Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, 26(2), 62-70. <https://doi.org/10.15174/au.2016.1438>.

Chávez, C., De-La-Torre, A., Bárcenas, H., Medellín, R. A., Zarza, H. y Ceballos, G. (2013). *Manual de fototrampeo para estudio de fauna silvestre. El jaguar en México como estudio de caso*. Alianza WWF-Telcel.

Chávez-García, D., Acosta-Lozano, N. V. y Andrade-Yucailla, V. C. (2022). *Manejo y Cría del Venado de Cola Blanca -Odocoileus Virginianus-*. Binario Editorial.

Clavijo-Gutiérrez, A. M. (2007). *Uso de hábitat por dos especies simpátricas de lagomorfos en tres asociaciones vegetales del Parque Nacional La Malinche*. [Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional UNAM. [En línea]. Disponible en: <https://ru.dgb.unam.mx/handle/20.500.14330/TESO1000616094>. Fecha de consulta: 22 de febrero de 2023.

CONABIO, Comisión Nacional de la Biodiversidad (2022). *Procesos ecológicos. Biodiversidad Mexicana*. [En línea]. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/procesose>. Fecha de consulta: 10 de julio de 2024.

Cortés-Gutiérrez, M. A., Altamirano-Álvarez, T. A. y Soriano-Sarabia, M. (2019). Mamíferos silvestres del bosque de encino en la Sierra de los Agustinos en el Municipio de Acámbaro, Guanajuato, México. *Revista de Zoología*, 30, 20-31.

Cortés-Marcial, M. y Briones-Salas, M. (2014). *Diversidad, abundancia relativa y patrones de ac-*

*tividad de mamíferos medianos y grandes en una selva seca del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México*. *Revista de Biología Tropical*, 62, 1433-1448.

Cruz-Bazan, E. J., Ramírez-Albores, J. E. y Chavez-Lugo, E. G. (2024). El fototrampeo en los monitoreos mastofaunísticos. *Therya Ixmana*, 3(3), 121-123. <https://doi.org/10.12933/therya-ixmana-24-535>.

Cruz-Espinoza, A., González-Pérez, G. E. y Ronel-Vázquez, P. (2012). Nota de la variación en la riqueza específica de mamíferos entre áreas de conservación y de aprovechamiento forestal en la sierra Madre de Oaxaca. *Therya*, 3, 327-332. <https://doi.org/10.12933/therya-12-88>

Cruz-Salazar, B., Ruiz-Montoya, L., Navarrete-Gutiérrez, D., & Bernardo-Vázquez, L. (2016). Influence of the composition and structure of modified landscapes on abundance of two marsupials during the dry season. *Therya*, 7(3): 393-406, <https://doi.org/10.12933/therya-16-401> ISSN 2007-3364.

Cruz-Salazar, B., Ruiz-Montoya, L., Navarrete-Gutiérrez, D., Espinoza-Medinilla, E. E., Vázquez-Domínguez, E. y Bernardo-Vázquez, L. (2014). Diversidad genética y abundancia relativa de *Didelphis marsupialis* y *Didelphis virginiana* en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85: 251-261.

DEWHA, Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts (2008). *Background document for the threat abatement plan for predation by feral cats*. [En línea]. Disponible en: <https://www.dceew.gov.au/sites/default/files/documents/tap-predation-feral-cats-2015-background.pdf>. Fecha de consulta: 17 de noviembre de 2022.

Dirzo, R., Young, H. S., Galetti, M., Ceballos, G., Isaac, N. J., & Collen, B. (2014). Defaunation in the Anthropocene. *Science*, 345, 401-406

Escamilla-Ramírez, C. S., Altamirano-Álvarez, T. A. y Soriano-Sarabia, M. (2020). Mamíferos silvestres medianos y grandes de las comunidades del Rincón y Peña de Lobos, municipio de Santa Ana Jilotzingo, Estado de México. *Revista de Zoología, UNAM*, 31, 31-61.

Falconi-Briones, F. A., Naranjo, E. J., Reyna-Hurtado, R., Spínola, M., Enríquez-Rocha, P., & Medellín, R. A. (2022). Habitat use and activity patterns of ungulates in a tropical rainforest of southern México. *Therya*, 13(2), 171-182.

Frisch, A. (1995). Hábitos y dietas de los mamíferos mexicanos como medida alternativa a la biodiversidad. [Tesis Licenciatura, Facultad de Cien-

- cias, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional UNAM. [En línea]. Disponible en: <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000230916/3/0230916.pdf>. Fecha de consulta: 17 de agosto de 2023.
- Galindo-Leal, C. y Weber, M. (1998). El Venado de la Sierra Madre Occidental. EDICUSA – CONABIO. [En línea]. Disponible en: [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_nlinks&ref=1344666&pid=S0034-7744201200010003300014&lng=e](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=1344666&pid=S0034-7744201200010003300014&lng=e). Fecha de consulta: 21 de septiembre de 2023.
- Gallina, S., Mandujano, S., Bello, J., López-Arévalo, H. F., & Weber, M. (2010). White-tailed deer *Odocoileus virginianus* (Zimmermann 1780). In J. M. Barbanti-Duarte & S. Gonzalez (Eds.), *Neotropical cervidology: biology and medicine of Latin American deer* (pp. 101-118). Funep and Gland, Switzerland.
- García-Morales, L. (2009). Diversidad florística y vegetación del Área Natural Protegida Altas Cumbres, Tamaulipas, México. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Institucional UANL. [En línea]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/21178/1/1020167109.pdf>. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2022.
- García-Morales, L. y Vargas, V. (2014) Florística y Vegetación del Área Natural Protegida Altas Cumbres, Tamaulipas, México. En A. Correa, J. V. Horta, J. García y L. Barrientos (Eds.), *Biodiversidad Tamaulipeca* (pp. 1-57). Tecnológico Nacional de México.
- Gittleman, J. L., Funk, S. M., MacDonald, D., & Wayne, R. K. (2001). 2001. Carnivore Conservation. Cambridge University Press.
- Gobierno de Tamaulipas / IEA, Instituto de Ecología Aplicada – UAT (2014) Programa de Manejo de la Zona Especial Sujeta a Conservación Ecológica “Área Natural Protegida Altas Cumbres”. Gobierno del Estado de Tamaulipas. Gobierno del Estado de Tamaulipas.
- Hall, E. R. (1981). The Mammals of North America. John-Wiley & Sons inc.
- Hammer, Ø., Harper, D., & Ryan, D. (2001). Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1-9. [http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm).
- Hernández-Jasso, R. E. (2015). Biocronología, Paleobiogeografía y Paleoecología de macromamíferos del Neógeno Tardío de Norteamérica meridional. [Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid]. UAM Biblioteca. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10486/669276>. Fecha de consulta: 10 de enero de 2025.
- Hernández-Jasso, R. E., Manuel-De-la-Rosa, Z. A., Mendoza-Gutiérrez, G. R. y Soria-Díaz, L. (2024). Registros norteños de *Mazama temama* y de *Leopardus wiedii* en el noreste de México. *Revista Bio Ciencias*, 11, e1564. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1564>.
- Hernández-Rodríguez, E., Escalera-Vázquez, L., Calderón-Patrón, J. M. y Mendoza, E. (2019). Mamíferos medianos y grandes en sitios de tala de impacto reducido y de conservación en la sierra Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2776>
- Hortelano-Moncada, Y., Ramos-Rendón, A. K., Gil-Alarcón, G., Landeta-Solis, L. J., Vilchis-Conde, J. M., Flores-Martínez, J. J., Rodríguez-Medina, R. y Cervantes, F. A. (2024). Dieta de gatos (*Felis silvestris catus*) y perros (*Canis lupus familiaris*) errantes en una reserva ecológica urbana en Ciudad de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 95: e955280 <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2024.95.5280>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Cuentame. [En línea]. Disponible en: [https://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tam/territorio/div\\_municipal.aspx?tema=me&e=28](https://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tam/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=28). Fecha de consulta: 8 de octubre de 2023.
- Lauricella, M. (2023). Morpho: Mammals: Elements of Comparative Morphology (Morpho: Anatomy for Artists Book 9). Rocky Nook.
- Lira-Torres, I. y Briones-Salas, M. (2011). Impacto de la ganadería extensiva y cacería de subsistencia sobre la abundancia relativa de mamíferos en la Selva Zoque, Oaxaca, México. *Therya*, 2: 217-244.
- Lyra-Jorge, M. C., Ciocheti, G., Pivello, V. R., & Meirelles, S. T. (2008). Comparing methods for sampling large-and medium-sized mammals: camera traps and track plots. *European Journal of Wildlife Research*, 54(4): 739-744.
- López-González, C. A., Ávila-Aguilar, D. y Cruz-Torres, M. F. (2015). Abundancia de lince (*Lynx rufus escuinapae* J. A. Allen, 1903) en el Parque Nacional El Cimatario, Querétaro, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 31(1): 138-140
- Mammal Diversity Database (2022). ASM Mammals Diversity Database. [En línea]. Disponible en: <https://www.mammaldiversity.org/>. Fecha de consulta:

ta: 12 de noviembre de 2021.

Mandujano, S. (2019). Índice de abundancia relativa: RAI. En S. Mandujano y L. A. Pérez-Solano (Eds.), *Fototrampeo en R: organización y análisis de datos* (pp. 137-152.). Instituto de Ecología A. C.

Medellín, S. y Grisales, V. (2021). Protocolo de Fototrampeo para el monitoreo de fauna en el Banco de Hábitat del Meta. Terrasos.

Mezhua-Velázquez, M. J., Serna-Lagunes, R., Torres-Cantú, G. B., Pérez-Gracida, L. D., Salazar-Ortiz, J. y Mora-Collado, N. (2022). Diversidad de mamíferos medianos y grandes del Ejido Zomajapa, Zongolica, Veracruz, México: implicaciones de manejo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(2), e3316.

MMA - ONU Medio Ambiente – CONAF-Medio Ambiente - ONU Medio Ambiente - Corporación Nacional Forestal (2021). Manual de uso de trampas cámaras para el monitoreo de carnívoros nativos y exóticos. Ministerio del Medio Ambiente – ONU Medio Ambiente.

Monroy-Vilchis, O., Zarco-González, M., Rodríguez-Soto, C., Soria-Díaz, L. y Urios, V. (2011). Fototrampeo de mamíferos en la Sierra Nanchititla, México: abundancia relativa y patrón de actividad. *Revista de Biología Tropical*, 59: 373-383. <https://doi.org/10.15517/rbt.v59i1.3206>

Moreno, C. E. (2001). Métodos para medir la biodiversidad, vol. 1. M&T-Manuales y Tesis SEA. *Zaragoza*, 84.

Morin, P. J. (2011). *Community Ecology*. Wiley-Blackwell.

O'Brien, T., Kinnaird, M., & Wibisono, H. (2003). Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical landscape. *Animal Conservation*, 6, 131-139.

Ochoa-Espinoza, J. M., Soria-Díaz, L., Astudillo-Sánchez, C. C., Treviño-Carreón, J., Barriga-Vallejo, C. y Maldonado-Camacho, E. (2023). Diversidad y abundancia de mamíferos del bosque mesófilo de montaña del noreste de México. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)*, 39, 1-18. <https://doi.org/10.21829/azm.2023.3912591>.

Ordóñez-Prado, C., Fuentes-López, M. E., Guerra-de-la-Cruz, V., Ortega-Vázquez, G y Álvarez-Muñoz, M. (2023). Diversidad de mamíferos medianos y grandes del Sitio Experimental Las Margaritas, Sierra Nororiental de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(78), 87-116. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i78.1386>.

Paliza-García, E. (2018). Pertinencia de los mamíferos como indicadores de diversidad biológica en las evaluaciones ambientales. La Molina, Facultad de Ciencia, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio institucional UNAM. [En línea]- Disponible en: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/96a30bb7-3394-4c78-862b-8e695189ede9/content>. Fecha de consulta: 29 de septiembre de 2024.

Palomares, F. & Caro, T. M. (1999). Interspecific killing among mammalian carnivores. *The American Naturalist*, 153, 492-508. <https://doi.org/10.2307/2463664>.

Periódico Oficial del Estado de Tamaulipas (1997). Acuerdo Gubernamental en el cual se declara área natural protegida clasificada como Zona Especial Sujeta a Conservación Ecológica con el nombre de “Área Natural Protegida Altas Cumbres” del Municipio de Ciudad Victoria, Tamaulipas. [En línea]. Disponible en: [https://conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema\\_nacional/documentos/ANPL/Tamps/ZESCE-ALTAS-CUMBRES.pdf](https://conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema_nacional/documentos/ANPL/Tamps/ZESCE-ALTAS-CUMBRES.pdf). Fecha de consulta: 14 de diciembre de 2021.

Persson, L. (1985). Asymmetrical competition: are larger animals competitively superior? *The American Naturalist*, 126, 261-266. <https://doi.org/10.1086/284413>.

Pyšek, P., Hulme, P. E., Simberloff, D., Bacher, S., Blackburn, T. M., Carlton, J. T., Dawson, W., Essl, F., Foxcroft, L. C., Genovesi, P., Jeschke, J. M., Kühn, I., Liebhold, A. M., Mandrak, N. E., Meyerson, L. A., Pauchard, A., Pergl, J., Roy, H. E., Seebens, H., ..., & Richardson, D. M. (2020). Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews*, 95(6), 1511-1534. <https://doi.org/10.1111/brv.12627>.

Rawlinson-Marín, M. I. (2024). La comunidad de mamíferos medianos y Grandes en un bosque templado durante los años 2017 y 2018 en Durango, México. [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco]. Repositorio Institucional de la UAM-Xochimilco. [En línea]. Disponible en: [https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/retrieve/27fca75e-1e73-40ba-b824\\_86f23701c174/252276.pdf](https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/retrieve/27fca75e-1e73-40ba-b824_86f23701c174/252276.pdf). Fecha de consulta: 9 de octubre de 2024.

Rendón-Hernández, E., Ayala-Pérez, L. A., Golubov, J. y Torres-Lara, R. (2024). Especies exóticas invasoras y sus implicaciones sobre los bosques de manglar en las reservas de la biosfera Ría Celestún y Ría Lagartos. *Madera y Bosques*, 30(4), e304

2627. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3042627>.

Ríos-Solís, J. A., Flores-Martínez, J. J. Sánchez-Cordero V. y Lavariega, M. C. (2021). Diversity and activity patterns of medium-and large-sized terrestrial mammals at the Los Tuxtlas Biosphere Reserve, México. *Therya*, 12(2): 237-248. <https://doi.org/10.12933/therya-21-1105>.

Ripple, W. J., Estes, J. A., Beschta, R. L., Wilmer, C. C., Ritchie, E. G., Hebblewhite, M., Berger, Joel., Elmhagen, B., Letnic, M., Nelson, M. P., Schmitz, O. J., Smith, D. W., Wallach, A. D., & Wirsing, A. J. (2014). Status and ecological effects of the world's largest carnivores. *Science*, 343, 1-11. <https://doi.org/10.1126/science.1241484>.

Rosatte, R. C. & Larivière, S. (2003) Skunks (genera *Mephitis*, *Spilogale*, and *Conepatus*). In G. A. Feldhamer, B. C. Thompson, & J. A. Chapman (Eds.), *Wild Mammals of North America: Biology, Management, and Conservation* (pp. 692-707). The Johns Hopkins University Press.

Rumiz, D. (2010). Distribución, ecología y conservación de los mamíferos medianos y grandes de Bolivia. En R. B. Wallace, H. Gómez, Z. R. Porcel y Rumiz, D. (Eds.), *Mamíferos grandes y medianos de Bolivia* (pp. 53-73). Centro de Ecología Difusión, Fundación Simón I. Patiño Editors.

Rzedowski, J. (1981). *Vegetación de México*. Limusa

Salazar-Ortiz, J., Barrera-Perales, M., Ramírez-Ramírez, G. y Serna-Lagunes, R. (2020). Diversidad de mamíferos del municipio de Tequila, Veracruz, México. *Abanico Veterinario*, 10, 1-18. <https://doi.org/10.21929/abavet2020.30>.

Salazar-Ortiz, J., Barrera-Perales, M., Bravo-Vinaja, M. G., Serna-Lagunes, R., Ocaña-Parada, C. de J., & Gastelum-Mendoza, F. I. (2022). Populational attributes of the central american red brocket deer (*Mazama temama*) in the Sierra de Zongolica, Veracruz, Mexico. *Agrociencia*, 1-13. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i3.2805>.

Sanderson E. W., Chetkiewicz, C. L., Medellín, R., Rabinowitz, A., Redford, K. H., Robinson, G. y Taber, A. B. (2002). Un análisis geográfico del estado de conservación y distribución de los jaguares a través de su área de distribución. En R. A. Medellín, C. Equihua, C. L. Chetkiewicz, P. Crawshaw, A. Rabinowitz, K. Redford, G. Robinson, E. W. Sanderson y A. B. Taber, (Eds.), *El Jaguar en el Nuevo Milenio* (pp. 551-600). Fondo de Cultura Económica/

Universidad Nacional Autónoma de México/Wildlife Conservation Society.

SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2019). Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. [En línea]. Disponible en: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/mex192085.pdf>. Fecha de consulta: 2 de diciembre de 2024.

Servicio Geológico Mexicano (2010). Panorama Minero del Estado de Tamaulipas. Secretaría de Economía, SGM (Servicio Geológico Mexicano). [En línea]. Disponible en: [https://www.sgm.gob.mx/Gobmx/productos/panoramas/TAMAULIPAS\\_sep2010.pdf](https://www.sgm.gob.mx/Gobmx/productos/panoramas/TAMAULIPAS_sep2010.pdf). Fecha de consulta: 29 de agosto de 2023.

Soria-Díaz, L., Fowler, M. S., & Monroy-Vilchis, O. (2017). Top-down and bottom-up control on cougar and its prey in a central Mexican natural reserve. *European Journal of Wildlife Research*, 63, 73. <https://doi.org/10.1007/s10344-017-1129-y>

Sunquist, M. & Sunquist, F. (2002). *Wild cats of the world*. Chicago Press.

Thompson, E. (2021). *Anatomy of Animals: Studies in the Forms of Mammals and Birds*. Rare Treasure Editions. Vargas, V., Sánchez-Rangel, N. E., Hernández-Cuevas, L. V. y Guevara-Guerrero, G. (2021). Riqueza de especies de hongos micorrízicos asociados a plantas de la familia Euphorbiaceae en el Área Natural Protegida Altas Cumbres, Tamaulipas, México. *CienciaUAT*, 16(1), 6-19. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1527>.

Vargas-Contreras, J. A. y Hernández-Huerta, A. (2001). Distribución altitudinal de la mastofauna en la reserva de la Biosfera "El Cielo", Tamaulipas, Mexico. *Acta Zoológica Mexicana (N.S.)*, 82, 82-109. <https://doi.org/10.21829/azm.2001.82821866>.

Vargas-Contreras, J. A., Rodríguez-Ruiz, E. R., Escalona-Segura, G., Herrera-Herrera, J. R., Garza-Torres, H. A. y Arroyo-Cabrales, J. (2023). Conservación de los mamíferos de Tamaulipas, México. En J. E. Sosa-Escalante, Y. Hortelano-Moncada, G. Sánchez-Rojas, M. Briones-Salas y G. Magaña-Cota (Eds.), *Riqueza y Conservación de los Mamíferos en México a Nivel Estatal* (pp. 521-528). Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Asociación Mexicana de Mastozoología A. C.

y Universidad de Guanajuato.

Vázquez, L. B. & Gastón, K. J. (2006). People and mammals in Mexico: conservation conflicts at a national scale. *Biodiversity and Conservation*, 15, 2397-2414.

Walter, H. (1970). Zonas de vegetación y clima. Omega, Barcelona.

Weber, W. & Rabinowitz, A. (1996). A global perspective on large carnivore conservation. *Conservation Biology*, 10: 1046-1054, <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041046.x>.

Weiler, A., Núñez, K., Peris, S., Silla, F., Airaldi, K., González-de-Weston, G., Cubilla, F., Salinas, P., Zaldivar, B., Valiente, E., Chavez, K., Ramos, Y., Tabilo, D. y Albertini, M. P. (2023). Guía para la identificación de mamíferos medianos y grandes del Chaco. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción.

Wong-Smer, J. R., Soria-Díaz, L. M., Horta-Vega, J. V., Astudillo-Sanchez, C. C., Gómez-Ortiz, Y. y Mora-Olivo A. (2022). Dieta y abundancia relativa de la zorra gris *Urocyon cinereoargenteus* (Carnivora: Canidae) en el Área Natural Protegida Altas Cumbres, Tamaulipas, México. *Acta Zoológica Mexicana (N.S.)*, 38(1), 1-16. <https://doi.org/10.21829/azm.2022.3812426>.

Zagal-García, K. V., Martínez-Garza, C. y Valenzuela-Galván, D. (2022). Captura fotográfica de mamíferos medianos en parcelas experimentales de restauración ecológica en un paisaje agropecuario en Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Acta Botánica Mexicana* 129: e1951. <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1951>



# Indicadores de sustentabilidad para Áreas Naturales Protegidas Sustainability indicators for Protected Natural Areas

David Muñoz-Marcelino<sup>1</sup>, María Concepción Martínez-Rodríguez<sup>1</sup>, Alejandro D. Camacho-Vera<sup>2</sup>

## RESUMEN

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son espacios designados para la protección, conservación, manejo y cuidado de la biodiversidad y sus ecosistemas. Los indicadores de sustentabilidad (IS) constituyen elementos para el diagnóstico y seguimiento del manejo de las ANP. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un análisis de la evolución de las publicaciones sobre el tema de IS e identificar IS para evaluar ANP. Utilizando la base de datos Web of Science, se realizó un estudio bibliométrico de las publicaciones relacionadas con el tema de IS. Posteriormente, se seleccionaron los artículos científicos que trataban sobre las ANP, para un análisis de contenido. Se obtuvieron 10 377 publicaciones entre 1980 a 2022 relacionadas con IS, abarcando temas desde crecimiento poblacional, urbanización, hasta inteligencia artificial. Durante el periodo 2012 a 2022, se publicó el 85 % del total de los trabajos localizados. La revista de mayor producción fue Sustainability, mientras que Renewable and Sustainable Energy Reviews presentaron el mayor factor de impacto. Se localizaron 1 022 artículos que consideraban la asociación de IS-ANP, pero solo 169 de ellos presentaron información concreta sobre aspectos económicos, sociales, ambientales e institucionales a considerar en la evaluación de ANP. Los temas que relacionan los IS con ANP en la búsqueda de la sustentabilidad fueron gestión, conservación, turismo sustentable y cambio climático, entre otros. Los IS asociados a las ANP identificados reflejaron que existe un interés creciente en la gestión y el involucramiento de los actores locales, los gobiernos y las organizaciones no gubernamentales como partes interesadas en conservar, proteger y cuidar la biodiversidad, y en asegurar la continuidad de los servicios ecosistémicos que brindan las ANP. Los IS-ANP proporcionan información base para la toma de decisiones sobre el patrimonio natural de cada país e incluso para políticas globales.

**PALABRAS CLAVE:** indicadores de sustentabilidad, áreas naturales protegidas, estudio bibliométrico.

## ABSTRACT

Protected Natural Areas (PNAs) are spaces designated for protecting, conserving, managing, and caring for biodiversity and its ecosystems. Sustainability indicators (SI) are elements for diagnosing and monitoring the management of PNAs. This work aims to develop an analysis of the evolution of publications on the subject of SI and to identify SIs to evaluate PNAs. Using the Web of Science database, we conducted a bibliometric study of SI-related publications. Subsequently, we selected scientific articles dealing with PNAs for content analysis. Between 1980 and 2022, we obtained 10 377 publications related to SI, covering topics ranging from population growth urbanization to artificial intelligence. During the period 2012 to 2022, 85% of the total number of works located were published. The journal with the highest production was Sustainability, while Renewable and Sustainable Energy Reviews presented the highest impact factor. We obtained a total of 1 022 articles that deal with the association of SI-PNA. However, only 169 presented concrete economic, social, environmental, and institutional information to consider in evaluating PNA. The topics that relate the SI with PNAs in the search for sustainability were management, conservation, sustainable tourism, and climate change, among others. The SIs associated with the PNAs identified reflected a growing interest in the management and involvement of local actors, governments, and non-governmental organizations as stakeholders in conserving, protecting, and caring for biodiversity and ensuring the continuity of the ecosystem services provided by the PNAs. The SI-PNAs provide basic information for decision-making on the natural heritage of each country and even for global policies.

**KEYWORDS:** sustainability indicators, protected natural areas, bibliometric study.

\*Correspondencia: [acamachov@ipn.mx](mailto:acamachov@ipn.mx) / Fecha de recepción: 7 de marzo de 2024 / Fecha de aceptación: 12 de noviembre de 2024 / Fecha de publicación: 9 de diciembre de 2024.

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Ciudad de México, México, C. P. 07340. <sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Unidad Santo Tomás, Departamento de Zoología, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala s/n, Santo Tomás, Alcaldía Miguel Hidalgo, Ciudad de México, México, C. P. 11340.

## INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de los recursos naturales en el mundo aumenta cada año, derivado de políticas expansivas enfocadas en atender necesidades básicas de la población y acrecentar el desarrollo económico (Kushawaha y col., 2021).

El Desarrollo Sustentable (DS) se presenta como el paradigma para enfrentar la crisis ambiental a nivel mundial, derivada de la demanda de recursos naturales, excediendo la capacidad de regeneración del planeta. Está en la base de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) (Naciones Unidas, 2015) e implica compromisos internacionales, desde la preocupación por el cambio climático, la protección de ecosistemas, el consumo responsable, la educación ambiental, la lucha contra la pobreza, soberanía alimentaria, hasta la promoción del desarrollo económico sostenible (Rockström y col., 2020).

Existen varias propuestas de modelos que se enfocan en diferentes aspectos y buscan alcanzar la sostenibilidad de distintas maneras. Cada idea expone y dimensiona de manera singular los daños tanto económicos, sociales y ambientales que resultan de problemas socioecológicos (Khoshnevis-Yazdi y col., 2017). Por ejemplo, Levett (1998) a través de su modelo de la “muñeca rusa” plantea que el ambiente condiciona el desarrollo económico y social. Rockström y col. (2009) introducen los límites planetarios y se convierten en la referencia básica para la conservación y estabilidad del ecosistema global y para atender los derechos fundamentales de la humanidad (Steffen y Morgan, 2021; Rockström y col., 2023). A partir de este trabajo, se desarrolla la propuesta del “espacio justo y seguro para la humanidad”, que combina la base social y las actividades humanas con los límites planetarios, resaltando la necesidad de una mayor equidad y eficiencia en el uso de los recursos en la búsqueda de un futuro más justo y sostenible para todos (Raworth, 2019). Así, al compartir principios básicos, estas y

otras propuestas no son excluyentes entre sí: ayudan a garantizar el DS, minimizando impactos negativos al ambiente y maximizando los beneficios para la humanidad.

No obstante, la idea de utilizar los recursos naturales de manera sostenible es un principio complejo. En 1992, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y el Desarrollo (Naciones Unidas, 1993), reconoce que: “Los Estados tienen el derecho soberano de explotar sus propios recursos según sus propias políticas ambientales, y la responsabilidad de asegurar que las actividades dentro de sus jurisdicciones o control no causen daño al medio ambiente de otros Estados o de áreas más allá de los límites de la jurisdicción nacional”. Es decir, cada nación puede aprovechar sus recursos naturales, según sus estrategias establecidas, pero sin dañar al ambiente de los países vecinos u otros países. En este sentido, las Áreas Naturales Protegidas (ANP) surgen como una estrategia para la conservación, cuidado y protección del ambiente, ante problemas ocasionados por la actividad humana como la expansión de la frontera agrícola y los procesos de industrialización (Fernandes, 2022; Outhwaite y col., 2022). Se pretende que las ANP sean capaces de soportar actividades humanas de manera sostenible sin comprometer su integridad ecológica (Menton y col., 2020).

Las ANP tienen un valor ambiental, pero también económico y científico, brindan servicios ambientales estratégicos como son: captación de agua, control de erosión, captura de CO<sup>2</sup>, hábitat para flora y fauna, amortiguamiento del cambio climático, belleza escénica, y fuente de recursos naturales (Protected Planet, 2024). Su cuidado depende del papel del ser humano, quien interviene con actividades cruciales como la gestión y monitoreo (Parsons, 1991; Cobián-Rojas y col., 2022).

Las ANP eficaces y equitativas son una herramienta esencial para abordar desafíos globales como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad, procesos que ponen en ries-

go no solo la estabilidad de los ecosistemas, sino también la salud humana. Ante este escenario, un hecho concreto es que la información sobre la eficacia de la gobernanza y la gestión en las ANP sigue siendo insuficiente, esto abarca la falta de evaluación sobre el manejo de manera equitativa, donde se incluyen los intereses de las personas que viven dentro y alrededor de estos espacios. A nivel mundial, solo se han realizado evaluaciones de la efectividad de la gestión en el 18.29 % de las áreas, y a la vez existe una gran probabilidad que muchas de ellas no cumplan con los estándares de efectividad total (Protected Planet, 2020).

Los indicadores de sustentabilidad (IS) buscan hacer un seguimiento objetivo de la gestión de las ANP y proporcionar una base para el análisis, discusión y toma de decisiones; se convierten en la herramienta para evaluar cuantitativa y cualitativamente, así como monitorear la sustentabilidad o su evolución a lo largo del tiempo (WRI, 1995; OECD, 2001). En este sentido, los IS constituyen instrumentos fundamentales del buen manejo de las ANP. Contribuyen a supervisar el estado de los ecosistemas, tomar decisiones fundamentadas, aumentar la transparencia y garantizar un futuro sostenible para estas áreas de gran valor. Pueden, entre otras cosas, identificar las zonas donde las comunidades son más vulnerables a los impactos negativos como la pérdida de recursos naturales, el deterioro de suelo por la agricultura, tala clandestina, mal manejo forestal, sobrepastoreo, la erosión cultural o la desigualdad económica (WRI, 1995; Protected Planet, 2020).

El objetivo del presente trabajo fue analizar la evolución del estudio de los IS, así como la asociación de los IS en ANP, desde 1980 a 2022, además de ubicar los indicadores más relevantes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo aplicó una metodología híbrida (Marcelino-Aranda y col., 2020), la cual involucra un análisis bibliométrico y un análisis

cualitativo del contenido. El análisis bibliométrico identifica, por ejemplo, autores, fuentes, palabras clave, e instituciones, y enriquece las investigaciones al ofrecer redes y conexiones entre el universo de información, así como cuantificar los datos y puede ayudar a detectar vacíos del conocimiento en el tema (Donthu y col., 2021; McAllister y col., 2022).

### Indicadores de sustentabilidad

El análisis bibliométrico, se trabajó a partir de los metadatos recabados del portal de investigación Web of Science (WoS) de Clarivate Analytics. Se decidió trabajar únicamente con el material de este portal, ya que la intención del presente estudio fue reconocer los documentos con mayor influencia e impacto en investigación. Cada revista de la WoS se encuentra indexada en el Journal Citation Report (JCR), lo cual demuestra la calidad y relevancia del trabajo.

La primera búsqueda de información consistió en reconocer los trabajos existentes en torno al tema de “Indicadores de sustentabilidad”, por lo que las palabras sometidas en el motor de búsqueda fueron: “sustainability indicators” “sustainability assessment”, “sustainability measurement”, “sustainability measurements models”, “principles of sustainability measurements”, “sustainability measurements projects”, “sustainability model”. De este primer rastreo se obtuvo un total de 10 377 publicaciones, localizando la primera en 1988. Dicha información se utilizó para indagar los temas que se han abordado, su procedencia y las fuentes donde se publica, así como para construir redes de autores y examinar la evolución de la temática. Debido a la gran cantidad de datos, y para facilitar el análisis de la información, se presentan los datos separados en tres periodos: 1988 a 2001, 2002 a 2011 y 2012 a 2022.

Con la información recabada, y considerando que el propósito inicial fue estudiar lo referente a IS-ANP, se decidió agregar un segundo filtro, utilizando las palabras: “National Parks”, “National Park”, “Natural Reserve” “Na-

tural Reserves”, “Natural Area”, “Natural Areas”, “Protected Natural Area”, “Protected Area”, “Protected Areas”, “Wildlife”. Con esta nueva variable, la búsqueda se contrajo a 1 002 productos científicos.

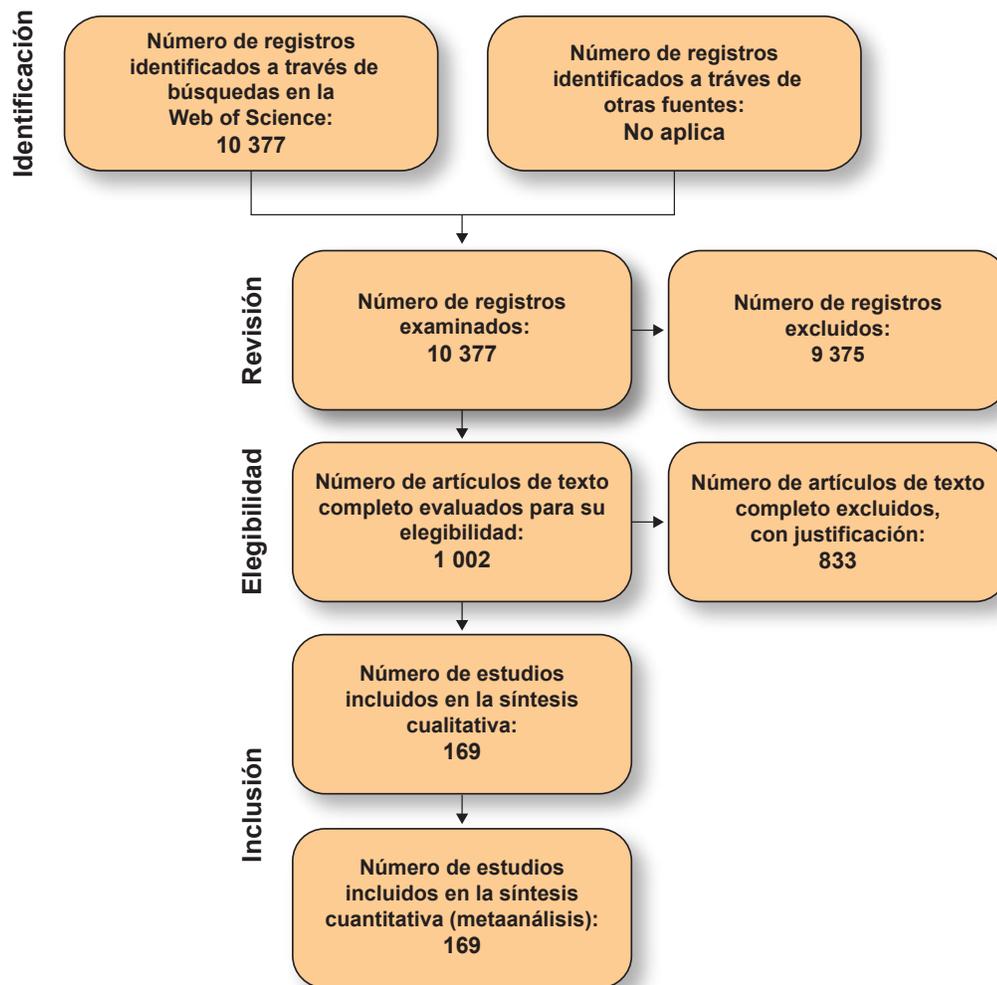
**Indicadores de sustentabilidad asociados a las ANP**

Para esta etapa de la investigación se decidió analizar únicamente los registros catalogados como artículos, los cuales representan el 88 % de los productos científicos, debido a su mayor frecuencia de publicación, la revisión rigurosa por pares y su capacidad para integrar e informar sobre los últi-

mos resultados de investigaciones (Velasco y col., 2011). Así, el total final de trabajos extraídos para el análisis fue de 169 artículos científicos; el proceso de depuración de la información se muestra en la Figura 1. A este resultado, se le aplicó el análisis cualitativo de contenido, inspeccionando en primera instancia que el título, las palabras clave, resumen y objetivo, abarcaran en conjunto todos los ámbitos (económicos, sociales, ambientales e institucionales) de la sustentabilidad.

**Análisis de datos**

Con la información recabada se realizó un mapeo de IS, acorde a las orientaciones y apor-



Fuente: Modificado a partir de Moher y col. (2010).

■ **Figura 1. Proceso de depuración de la información.**

Figure 1. Information depuration process.

taciones teóricas sobre los parámetros a considerar para la evaluación en ANP (ambientales, sociales, económicos e institucionales), y con ello aportar en los procesos de planificación y manejo.

Para el procesamiento de los datos se utilizó la herramienta bibliométrica VOSviewer versión 1.6.18 y Rstudio versión 4.3.2, las cuales permiten distintas opciones de visualización: el desarrollo de diagramas y redes, en formatos diversos, de cocitación, coocurrencia, citaciones, emparejamiento bibliográfico, a partir de una gran cantidad de datos (McAllister y col., 2022).

## RESULTADOS

### Publicaciones de sustentabilidad

De los 10 377 productos de investigación, localizados en la WoS, durante el periodo estudiado, el 82 % son artículos científicos que se encuentran en más de 200 fuentes y afiliaciones, y donde 22 revistas concentran el 32 % de la producción. Por otro lado, 13 % son trabajos de simposios y/o congresos, 3 % de libros y capítulos, y el resto de otros tipos de documentos.

La producción científica dividida en tres periodos (Tabla 1), indicó que, el primer periodo (1988 a 2001), representa el 2 % de los productos (214 publicaciones), de estos 53 % son artículos científicos, la primera revista en publicar un trabajo sobre IS fue “Environmental Management”. El segundo periodo (2002 a 2011), abarca el 13 % de la producción (1 372 trabajos); siendo “Ecological Indicators” la fuente que publicó más sobre el tema (47 artículos). Para el tercer periodo (2012 a 2022) se puede observar un notable aumento de la producción científica sobre IS, ya que representa el 85 % del total de los trabajos (8 791).

Existen más de 136 grupos de autores, provienen de países como los Estados Unidos, que tiene la mayor productividad con 12 %, seguido de China con 9 %, Inglaterra 8 %, España e Italia con 7 % cada uno; en Latinoamérica, aparece Brasil con el 5 % y México con el 2 %.

Las fuentes “Sustainability” y “Journal of Cleaner Production” publicaron la mayoría de los trabajos que permiten medir y evaluar el impacto del cambio climático global y el progreso hacia el DS. “Sustainability” cuenta con mayor número de publicaciones, 8 % del total, su factor de impacto es de 3.9, y se encuentra en el cuartil 2 de las categorías Environmental Sciences (posición 114/275) y Environmental Studies (posición 48/128), lo que podría influir en recibir una mayor cantidad de propuestas sobre el tema.

En el primer periodo (1988 a 2001), los temas se enfocaron en aspectos como son el ciclo del nitrógeno, crecimiento poblacional, agricultura y empresas. Sin embargo, estas temáticas no aparecen en la Figura 2, donde el software empleado (R estudio) solo toma aquellos temas citados al menos 5 veces en la WoS, lo que sugiere que la atención se dio a nuevas problemáticas o soluciones. A partir del segundo periodo (2002 a 2011), autores con alta productividad en el tema como Afgan, Azapagic y Bren, realizaron trabajos, iniciando con cuestiones de urbanismo, infraestructura verde, modelos ecológicos, uso de suelo; y para finalizar el periodo abarcaron temas de agricultura sustentable, ciencia sustentable y huella ecológica. En el último periodo, de 2012 a 2022, en el que hubo mayor producción, destacan autores como Kucukvar, Ren, Onat, Tatari y Wang, quienes se han enfocado en aspectos como energías renovables, sustentabilidad corporativa, DS, objetivos del DS, economía circular, y temas que han marcado la última década como es Covid-19, inteligencia artificial y costo de oportunidad, entre otros. En el segundo periodo fue donde surgieron publicaciones con mayor variedad temática sobre el DS, además de que estas publicaciones fueron las más citadas durante el tiempo analizado, lo que podría deberse al tiempo de publicación, y a que temas como ciencia sustentable, huella ecológica, zonificación, análisis multicriterio, responsabilidad social, agricultura sustentable, no solo continuaron vigentes en el tercer periodo, sino que fueron tendencia.

■ **Tabla 1. Indicadores de Sustentabilidad. Fuentes y publicaciones por periodo.**  
 Table 1. Sustainability Indicators. Sources and publications per period.

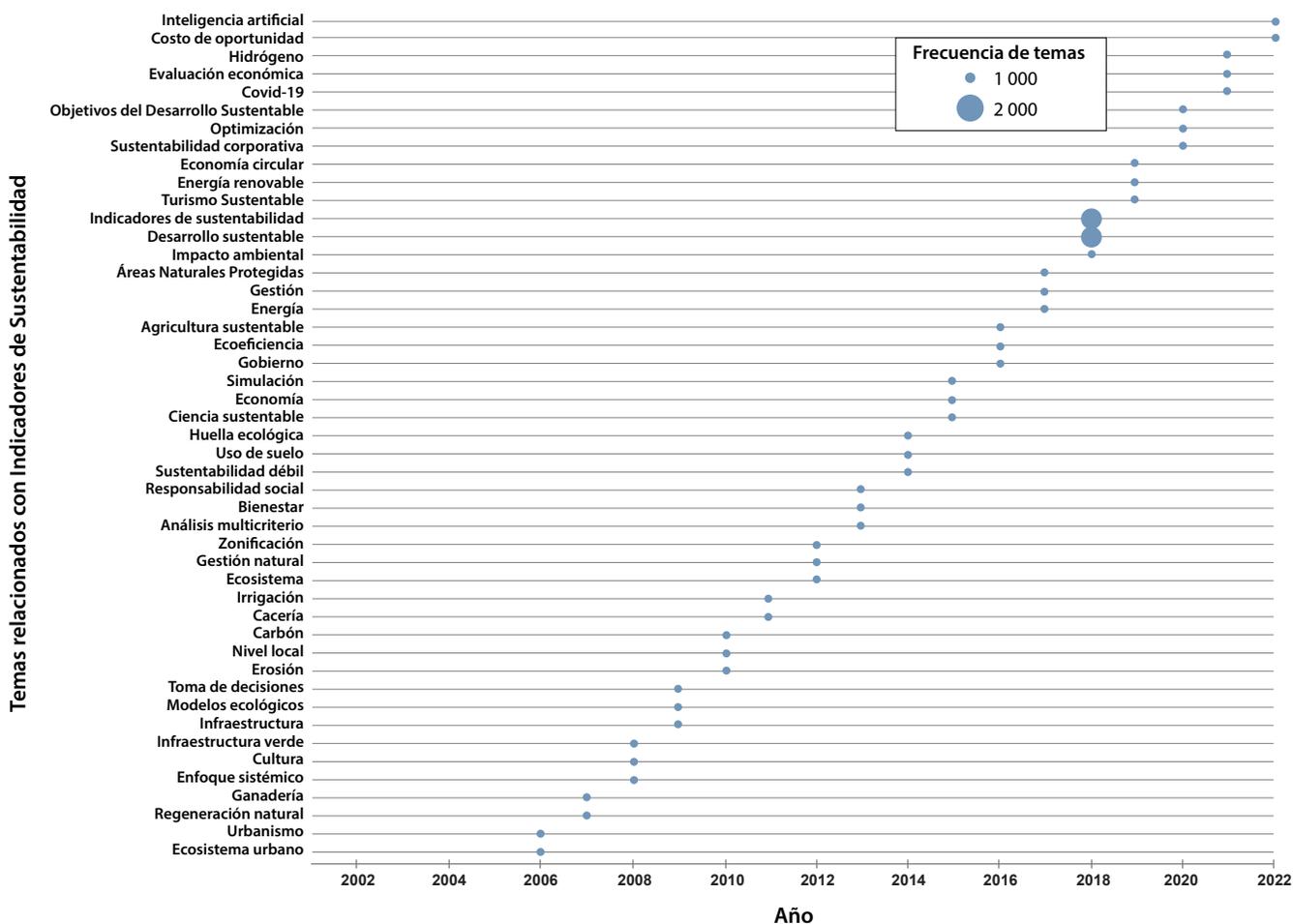
Fuente	Factor de Impacto (2022)	Publicaciones			
		1988-2001	2002-2011	2012-2022	Total
Sustainability	3.9		6	779	785
Journal of Cleaner Production	11.1		33	671	704
Ecological Indicators	6.9		47	189	236
The International Journal of Life Cycle Assessment	4.8		12	130	142
Renewable & Sustainable Energy Reviews	15.9		17	120	137
Science of the Total Environment	9.8	1	4	113	118
Ecological Economics	7	13	40	44	97
Journal of Environmental Management	8.7	4	19	69	92
Sustainable Cities & Society	11.7			88	88
Environmental Development & Sustainability	5.4			88	88
Energies	3.2			86	86
Environmental Impact Assessment Review	7.9	2	16	65	83
Energy	9		9	73	82
Resources Conservation and Recycling	13.2		5	68	73
Clean Technologies and Environmental Policy	4.3		7	64	71
Procedia CIRP				68	68
Sustainable Development	12.5	2	13	50	65
Journal of Industrial Ecology	5.9		8	54	62
Sustainable Production & Consumption	12.1			61	61
International Journal of Sustainable Development and World Ecology	5.6	5	20	30	55
Energy Policy	9	1	18	34	53
Environmental Science and Pollution Research	5.8		2	51	53
180 fuentes más	-	186	1 096	5 796	7 078
Total		214	1 372	8 791	10 377

De los 10 377 trabajos, sólo el 9.6 % son artículos científicos que vinculan IS-ANP (1 002 resultados).

#### Indicadores de sustentabilidad asociados a ANP

La Tabla 2 muestra los 10 trabajos más cita-

dos que asocian los IS-ANP (con un mínimo de 56 citas). Se puede observar que el estudio “Using resilience concepts to investigate the impacts of protected area tourism on communities”, publicado en 2010, es la publicación con mayor número de citas (199); los autores, a través de un enfoque de siste-



■ Figura 2. Temas de tendencia a través del tiempo (2002 a 2022).

Figure 2. Trending topics over time (2002 a 2022).

mas y la aplicación de un modelo socioecológico y de resiliencia, proponen la creación de IS-ANP, empleando variables como la residencia, empleo, actividades económicas, distancia sociocultural, participación de la población local, regulaciones, actores clave, futuros escenarios, gestión del área y aspectos en la naturaleza (Strickland-Munro y col., 2010).

También, destaca el documento “Understanding protected area resilience: A multi-scale, social-ecological approach”, de Cumming y col. (2015), el cual, es una publicación reciente y se sitúa dentro de las tres primeras posiciones de la lista. En esta, se rechaza la concepción tradicional de que las ANP son entidades aisladas, sosteniendo que se encuentran in-

terconectadas con los sistemas sociales y ecológicos adyacentes en diversos niveles. En su trabajo, los autores sugieren una serie de indicadores para medir y evaluar la resiliencia en áreas protegidas, tales como la variedad de especies, la conectividad del paisaje, la capacidad de adaptación en la gobernanza, la participación de las comunidades locales y el capital social.

Prato, es un autor destacado en el tema de estudio, sugiere junto a Herath, que los IS son esenciales para la gestión adaptativa de las ANP. Por ejemplo, presentan un análisis de decisión de criterios múltiples (Prato y Herath, 2007) (Tabla 2) para evaluar la salud del ecosistema, el bienestar social y las actividades humanas, de gestión y medición del rendimien-

■ **Tabla 2. Artículos más citados en el tema de Indicadores de Sustentabilidad en Áreas Naturales Protegidas.**

Table 2. Most cited articles about Sustainability Indicators in Protected Natural Areas.

Artículo	Autores	Año	Revista	Citaciones
Using resilience concepts to investigate the impacts of protected area tourism on communities	Strickland-Munro y col.	2010	Annals of Tourism Research	199
Sustainability indicators for tourism destination: A complex adaptive systems approach using systemic indicator systems	Schianetz y Kavanagh	2008	Journal of Sustainable Tourism	167
Understanding protected area resilience: A multi-scale, social-ecological approach	Cumming y col.	2015	Ecological Applications	162
Predicting land use/land cover changes using CA-Markov model under two different scenarios	Hamad y col.	2018	Sustainability	153
Modelling multiple objectives of land use for sustainable development	Zander y Kachele	1999	Agricultural Systems	128
Delineating boundaries of social-ecological systems for landscape planning: A comprehensive spatial approach	Martin-López y col.	2017	Land Use Policy	80
Urban green and blue: Who value what and where?	Sander y Zhao	2015	Land Use Policy	66
OECD pressure–state–response indicators for managing biodiversity: a realistic perspective for a French biosphere reserve	Levrel y col.	2009	Biodiversity and Conservation	66
Fuzzy adaptive management of social and ecological carrying capacities for protected areas	Prato	2009	Journal of Environmental Management	63
Multiple-criteria decision analysis for integrated catchment management	Prato y Herath	2007	Ecological Economics	56

to neto de actividades económicas; además, Prato (2009), brinda información para ajustar las estrategias de manejo a las condiciones cambiantes.

En la Tabla 3, se pueden apreciar autores como Choi, West, Costanza, Lee, Ostrom, Reed, Tanguay, Bennett, entre otros, que han sido referencia en los trabajos en el tema de IS-ANP.

■ Tabla 3. Autores de referencia en el tema de Indicadores de Sustentabilidad en Áreas Naturales Protegidas.

Table 3. Reference authors about Sustainability Indicators in Protected Natural Areas.

Autor(es) de referencia	Artículo	Revista/Afiliación	Número de documentos en el que se cita
Choi y Sirakaya (2006)	Sustainability indicators for managing community tourism	Tourism Management	13
Dudley (2008)	Guidelines for applying protected area management categories	Unión Internacional para Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales	11
West y col. (2006)	An anthropological perspective on some unexpected consequences of protected areas	Conservation Biology	10
Naughton-Treves y col. (2005)	The role of protected areas in conserving biodiversity and sustaining local livelihoods	Annual Review of Environment and Resources	9
Costanza y col. (1997)	The value of the world's ecosystem services and natural capital	Nature	8
Agyeiwaah y col. (2017)	Identifying core indicators of sustainable tourism: A path forward?	Tourism Management	8
Butler (1999)	Sustainable tourism: A state-of-the art review	Tourism Geographies	8
Schianetz y Kavanagh (2008)	Sustainability indicators for tourism destinations: A complex adaptive systems approach using systemic indicator systems	Journal of Sustainable Tourism	8
Lee (2013)	Influence analysis of community resident support for sustainable tourism development	Tourism Management	7
Twining-Ward y Butler (2002)	Implementing STD on a small island: Development and use of sustainable tourism development indicator in Samoa	Journal of Sustainable Tourism	7
Jamal y Stronza (2009)	Collaboration theory and tourism practice in protected areas: stakeholders, structuring and sustainability	Journal of Sustainable Tourism	7
Reed y col. (2006)	An adaptive learning process for developing and applying sustainability indicators with local communities	Ecological Economics	7
Bennett y col. (2017)	Conservation social science: Understanding and integrating human dimensions to improve conservation	Biological Conservation	7

Continúa...

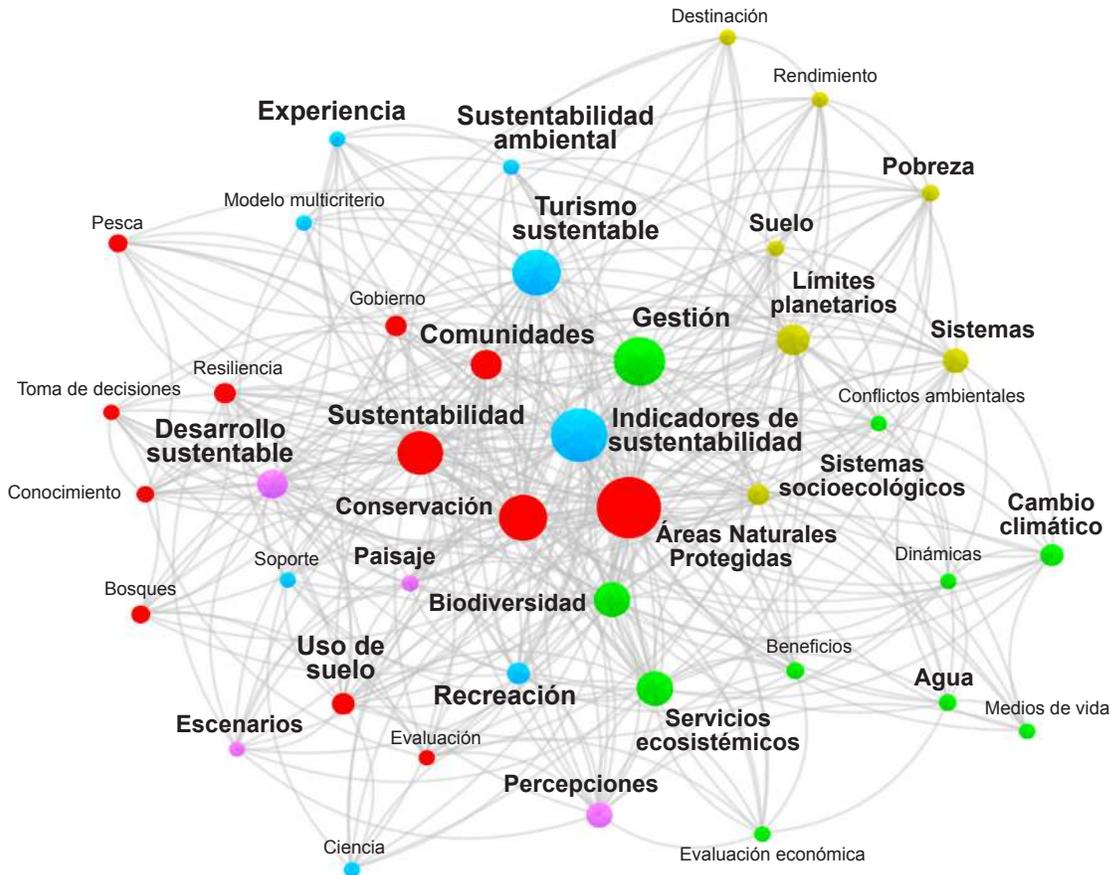
Oldekop y col. (2015)	A global assessment of the social and conservation outcomes of protected areas	Conservation Biology	6
Miller (2001)	The development of indicators for sustainable tourism: results of a Delphi survey of tourism researchers	Tourism Management	6
Eagles (2013)	Research priorities in park tourism	Journal of Sustainable Tourism	6
Ostrom (2009)	A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems	Science	6
Tanguay y col. (2012)	Sustainable tourism indicators: selection criteria for policy implementation and scientific recognition	Journal of Sustainable Tourism	6

Asimismo, se puede observar las principales fuentes donde han publicado sus artículos científicos, como son las revistas *Tourism Management*, *Conservation Biology*, *Ecological Economics*, *Nature*, *Journal of Sustainable Tourism*, *Biological Conservation* y *Science*. Los autores Choi y Sirakaya (2006), que han contribuido en 13 trabajos, por su artículo “*Sustainability indicators for managing community tourism*”, en la revista *Tourism Management*, desarrollaron un conjunto de indicadores a través del empleo de la técnica Delphi, estableciendo parámetros en las dimensiones de política, social, ecología, economía, tecnología y cultura, en contribución de un marco sostenible; a través de estas dimensiones, contribuyen en la formación de índices compuestos ante la dificultad de obtener o intentar monitorear una trayectoria en específico para evaluar la sustentabilidad.

Los 169 artículos científicos construyen una red de coocurrencia de más de 1 000 palabras clave (Figura 3), las cuales conforman 5 clústeres (grupos) alrededor de la temática de “ANP”. En el clúster 1, destaca la relación de las ANP en el 100 % de los trabajos, enfatizando su vinculación con conceptos como conservación, sustentabilidad, comunidades, uso de suelo, resiliencia, gobierno, bosques, entre otros. El segundo clúster, con una coocurrencia del 71 %, se centra en el tema

de los “IS” (indicadores de sustentabilidad), principalmente relacionados con el turismo sustentable, la recreación, la sustentabilidad ambiental y experiencia. En el tercer grupo con un porcentaje de coocurrencia del 58 %, se enfoca en la “gestión” (de las ANP), incluyendo temas como biodiversidad, servicios ecosistémicos, cambio climático y agua. En este contexto, se resalta que la eficiencia en la gestión depende del uso adecuado del presupuesto, más que de aspectos multidimensionales (Binnqüist-Cervantes y col., 2017). Con un porcentaje de coocurrencia del 20 %, en el cuarto clúster destaca el término de “límites planetarios”, relacionándolo con sistemas, sistemas socioecológicos, pobreza, uso del suelo, destinación y rendimiento. El último clúster, con una coocurrencia del 17 %, se centra en el tema de “DS” (Desarrollo Sustentable), incluyendo percepciones y paisaje; este clúster representa el marco de referencia para los Objetivos plasmados en la Agenda 2030. Los IS se utilizan para medir el cumplimiento de los ODS y para guiar el desarrollo de estrategias y acciones para su logro.

Los temas mayor tendencia de IS-ANP, se registraron a partir de 2015, con DS, el cual fue tendencia hasta 2018; posteriormente el DS queda implícito en otros temas más específicos. Aunque en 2016, turismo sustentable y sistemas de información geográfica (SIG) aparecen



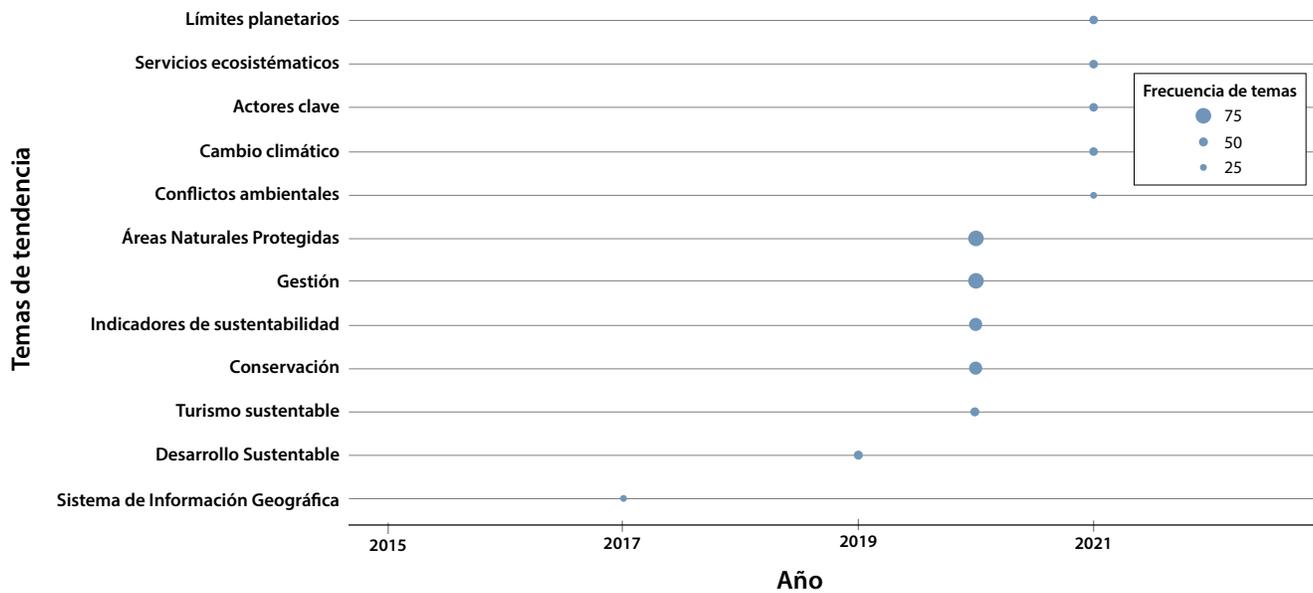
Clúster 1	%	Clúster 2	%	Clúster 3	%	Clúster 4	%	Clúster 5	%
Áreas Naturales Protegidas	100	Indicadores de sustentabilidad	71	Gestión	58	Límites planetarios	20	Desarrollo Sustentable	17
Conservación	50	Turismo sustentable	49	Biodiversidad	25	Sistemas	12	Percepciones	13
Sustentabilidad	43	Recreación	9	Servicios ecosistémicos	25	Sistemas socioecológicos	8	Paisaje	5
Comunidades	18	Sustentabilidad ambiental	4	Cambio climático	9	Pobreza	5	Escenarios	4
Uso de suelo	9	Experiencia	4	Agua	5	Suelo	4		

■ **Figura 3. Red de temas inmersos en Indicadores de Sustentabilidad en Áreas Naturales Protegidas.**  
 Figure 3. Network of topics immersed in Sustainability Indicators in Protected Natural Areas.

entre los temas más estudiados, pero fue en el año 2017, cuando los trabajos buscaron reforzar las propuestas de indicadores con mayor tendencia para medir la sustentabilidad en el área de SIG, y hasta 2020, turismo sustentable fue tema de tendencia. Durante ese mismo año, aparece un gran interés en indagar sobre la gestión, ANP, IS y conservación, por lo que rápidamente se hicieron tendencia (Figura 4).

De la información anterior, y del análisis de los trabajos de investigación de IS-ANP, en la Tabla 4 se presentan los principales aspectos para la evaluación de la sustentabilidad

considerando las dimensiones: ambientales, sociales, económicas y políticas o institucionales, como el medio para regular y gestionar las áreas destinadas para protección y conservación. Debido a limitaciones de espacio las referencias completas que proponen cada indicador se encuentran en (Web of Science, 2022). En la parte ambiental, se obtuvieron aspectos como la biodiversidad, clima, recurso hídrico, contaminación, uso de suelo, deforestación, erosión, geomorfología, huella ecológica, entre otros. En lo social, se ha analizado en los trabajos de investigación aspectos de resiliencia, actividades humanas, migración, salud, patrimonio cultural, capital social, parti-



■ **Figura 4. Temas de tendencia en las Áreas Naturales Protegidas e Indicadores de Sustentabilidad.**  
Figure 4. Trending topics in Protected Natural Areas and Sustainability Indicators.

cipación de actores, igualdad de género, por mencionar algunos. En lo económico, se consideraron las actividades económicas en las áreas industriales, comerciales, costeras y turísticas, empleo local, nivel de ingresos monetarios, pobreza, recursos forestales y no forestales, capital natural, entre otros; y en los aspectos políticos, se ha evaluado la gestión, instituciones, partes interesadas, políticas públicas, programas y apoyos sociales, gestión de residuos, tecnologías verdes, suministros de agua, infraestructura, entre otros, para el cuidado y gestión de los recursos (Aktsoğlu y Gaidajis, 2020; Asmantaitė y col., 2021; Hosseini y col., 2021).

## DISCUSIÓN

La sustentabilidad ha sido el concepto que ha conducido las investigaciones analizadas. Las tendencias actuales en el tema de IS para ANP, abordan cuestiones relacionadas a turismo sustentable, los impactos por el cambio climático, los actores clave, la gestión, conservación, límites planetarios, servicios ecosistémicos, conflictos ambientales, entre otros. Sin embargo, ante las emisiones de los gases de efecto invernadero, el comportamiento de

las empresas, la creación de energías renovables, el problema de la sobreproducción y el consumo desmedido, la sociedad requiere alternativas sustentables para evitar o mitigar las consecuencias del calentamiento global y sobre todo, ante la evidencia de los límites planetarios, que se han planteado desde el año 2009 (Rockström y col., 2009). La pérdida de biodiversidad, la deforestación y cambios de uso de suelo, uso del agua, entre otros, han rebasado la zona de incertidumbre, y ante el riesgo de aumento de la temperatura global de arriba de 1.5 °C, resultan la necesidad de medidas de contingencia (Convention on Biological Diversity, 2010; 2020).

## Indicadores de sustentabilidad

Las más de 10 000 publicaciones científicas de IS que se registran en la WoS, muestran la importancia que le dan investigadores a esta actividad. El primer trabajo se publicó en 1988, un año después del planteamiento formal del DS (Brundtland, 1987), lo cual, muestra el interés de la academia y organismos internacionales en el cuidado y protección del ambiente, pero sin dejar de lado aspectos como crecimiento económico y el bienestar social (Men-

■ **Tabla 4. Indicadores de Sustentabilidad para Áreas Naturales Protegidas con número de referencias.**  
 Table 4. Sustainability Indicators for Protected Natural Areas with number of references.

<b>Dimensiones</b>			
<b>Ambientales</b>			
Biodiversidad	113	Ubicación geográfica (contexto geográfico)	15
Clima	12	Pradera	6
Valor ecológico del área (actividades de investigación, atractivo turístico, servicios ecosistémicos)	85	Erosión (hídrica, eólica, antropogénica)	42
Recurso hídrico (ríos, lagos, manantiales, etc.)	48	Deslizamientos de tierra	3
Contaminación	39	Litología	4
Uso del Suelo	104	Sequía	10
Zona de conservación	109	Inundaciones	2
Geomorfología	26	Incendios forestales	5
Cobertura forestal	50	Huella ecológica	28
Deforestación	28		
<b>Sociales</b>			
Resiliencia	35	Vialidades	28
Antropógeno (actividad humana)	73	Participación de actores (indígenas, ejidatarios, etc.)	116
Mancha urbana	39	Educación	22
Conflictos ambientales	15	Alimentación	18
Migración	9	Salud	11
Patrimonio cultural	56	Equidad (igualdad de género)	10
Aprendizaje comunitario	32	Capital social (seguridad, salud, educación, alimentos, ingresos y recreación)	65
Asequibilidad a infraestructura	11		
<b>Económicos</b>			
Negocios locales	38	Actividades costeras	9
Empleo local	40	Actividades turísticas	83
Ingresos	104	Valores de propiedad	18
Agricultura	64	Pobreza	52
Ganadería	39	Recursos forestales y no forestales	22
Actividades industriales	7	Capital natural (ingresos de servicios ecosistémicos, pesca, cosecha y recreación)	44
Actividades comerciales	22		
<b>Políticos</b>			
Gestión (programas de manejo, normatividad)	136	Infraestructura	53
Instituciones (gobierno, universidades, ONG y empresas)	51	Tecnologías verdes (aire, agua y energía)	25
Partes interesadas (comunidades locales, compañías, gobiernos, ONG)	112	Gestión de residuos	22
Políticas públicas	99	Suministros de agua	23
Programas y apoyos sociales	35	Cohesión social (actividades comunales, operaciones de socorro, reforestación, etc.)	29
Señalamientos ambientales	7	Transparencia (acceso a la información)	16

ton y col., 2020). En este primer trabajo de Liverman y col. (1988), se plantea el interés de crear sistemas útiles de medición entre el ambiente y el DS por medio de indicadores que pudieran evaluar condiciones como la sensibilidad al cambio en el ambiente a través del tiempo y del espacio, y predecir los efectos de la intervención humana. En la recolección, integración y transformación de datos de ese estudio, se obtuvieron así los primeros indicadores que trataban sobre la erosión, uso del suelo, población, calidad de vida, e importancia de la energía en los procesos de producción y consumo.

La tendencia sobre el interés de los IS se mantuvo constante los primeros dos periodos. Fue a mediados del tercer periodo, en el año 2012, cuando se presenta el primer repunte de artículos, esto aparentemente en relación con el planteamiento de las Metas del AICHI (nombre asignado a partir de una Prefectura en Japón), que se establecieron para cumplir el Plan Estratégico para la Diversidad Biológica (2011 a 2020) (Convention on Biological Diversity, 2010; 2020); una referencia importante, en este periodo, es el trabajo “An overview of sustainability assessment methodologies”, donde los autores plantean que la evaluación de la sustentabilidad es una herramienta poderosa en la toma de decisiones y formulación de políticas públicas, a partir del desempeño empresarial y de los países (Singh y col., 2012). Posteriormente, en el 2015 se aprobó en la ONU, la Agenda 2030, que es el referente general sobre el tema.

### Indicadores de sustentabilidad en ANP

La primera publicación que aborda IS-ANP se identifica en el año de 1993. Munasinghe (1993), en su investigación determinó los siguientes parámetros a considerar para la evaluación en espacios naturales: en cuanto a la dimensión ambiental, considera biodiversidad, valor ecológico del área, y zona de conservación; por lo que respecta a la dimensión social, apunta el patrimonio cultural y la participación de actores; en la dimensión económica, el ingreso, recursos forestales, capital natural

y pobreza; y en el aspecto institucional, la gestión, partes interesadas, turismo, políticas y programas, diseño verde y suministro de agua.

El estudio de Munasinghe (1993), junto con el de Schelhas (1994) y Zander y Kachele (1999), conforman los únicos trabajos en abordar IS-ANP antes del inicio del nuevo siglo, mientras que en paralelo se desarrollaban eventos internacionales de gran envergadura como la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro, en 1992, la COP1 (Nassau, Bahamas), en 1994, y en 1997 se diera la adopción del Protocolo de Kyoto. Llama la atención que las investigaciones sobre IS-ANP repuntaran hasta el año 2018, mostrando un total de 14 publicaciones; siendo el 2021 el año más activo en cuanto a producción, reportando 41 trabajos, publicados en revistas como *Sustainability*, *Journal of Sustainable Tourism*, *Science of the total Environment*, *Ecological Indicators*, *Environmental Management*, *Forest, Land and Use Policy*, *Nature* y *Journal of Cleaner Production*.

Se destaca la publicación de Choi y Sirakaya (2006). Los autores establecen diversos parámetros en cuestiones de política pública, aspectos sociales, ecológicos, tecnología y cultura, estableciendo 125 indicadores que buscan contribuir a un marco sostenible, a niveles regionales y locales, en apoyo de la planificación, gestión y desarrollo de actividades económicas, recreativas, entre otras, como el monitoreo de los cambios socioeconómicos, políticos y ambientales en áreas protegidas. Costanza y col. (1997), son un referente en las evaluaciones económico-ambientales; particularmente en su publicación de “The value of the world’s ecosystems services and natural capital”, donde plantean la determinación del valor de los ecosistemas, desde la perspectiva de las acciones antropogénicas y el costo monetario que se necesita para contrarrestar la situación de los problemas en el ambiente, a partir de estimaciones de valor de los diferentes beneficios que proporciona la naturaleza para el flujo de bienes y servicios, para las personas y para la sociedad en su conjunto. Las estimaciones de valor se realizan a par-

tir de parámetros económicos, físicos o de infraestructura, capital humano, y costo-beneficio ante la reducción en la disponibilidad de los recursos naturales; en este punto, los IS resultan de gran importancia en relación con el manejo del patrimonio de cada país y en algunos casos con importancia en los equilibrios globales como en el caso del agua dulce. Los IS-ANP resultan pertinentes para ser incorporados en el sistema de contabilidad nacional de cada país.

Algunos aspectos que no han sido estudiados o que requieren mayor atención son los conflictos socioambientales, que surgen en países pobres o emergentes donde se enfrentan los pobladores con grandes empresas o con los gobiernos (Bontempi y col., 2023); además de otros problemas como aprovechamientos ilegales, caza furtiva, incendios provocados y la influencia del crimen organizado en el manejo de las ANP, son asuntos que no se presentan en los países desarrollados (Carranza y col., 2020), los cuales son los que integran la mayoría de las publicaciones analizadas en este estudio.

Otra limitación del presente trabajo es que la información proviene de la base WoS, dejando de lado plataformas como Google Scholar, Scopus, repositorios institucionales y otras fuentes que contienen productos científicos, que podrían ser incluidos. Tampoco se incluyó información de fuentes no arbitradas como periódicos, reportajes, informes internos de dependencias y otras fuentes de información secundarias.

## CONCLUSIONES

A partir de 1988 se localizaron 10 377 publicaciones que trataban temas sobre IS. La producción se incrementó notablemente desde el 2012, con el 85 % del total de los trabajos identificados. Los artículos científicos fueron las contribuciones que integraron el 82 % del total de las publicaciones, los cuales se incluyeron en más de 200 fuentes, concentrándose el 32 % de estos en 22 revistas. Las temáticas iniciales, en las que la acade-

mia fijó su atención, mantuvieron su interés en el tiempo, pero fueron complementadas con temas como agricultura sustentable, ciencia sustentable y huella ecológica. Otros temas más recientes que surgieron son las energías renovables, sustentabilidad corporativa, DS, economía circular, Covid-19 e inteligencia artificial. La relación IS-ANP se abordó a partir de 1993, representando solo 9.6 % de la producción localizada. La temática desarrollada abarcó los ámbitos de sustentabilidad ambiental (biodiversidad, clima, recurso hídrico, contaminación, uso de suelo, deforestación, erosión, geomorfología, huella ecológica); social (resiliencia, actividades humanas, migración, salud, patrimonio cultural, capital social, participación de actores, igualdad de género); económica (áreas industriales, comerciales, costeras y turísticas, empleo local, nivel de ingresos monetarios, pobreza, recursos forestales y no forestales, valores de propiedad, capital natural); y política (gestión, instituciones, partes interesadas, políticas públicas, programas y apoyos sociales, gestión de residuos, tecnologías verdes, suministros de agua, infraestructura). Los temas mostraron un interés creciente en la gestión, el involucramiento, de los actores locales, los gobiernos y organizaciones no gubernamentales, la conservación y protección de la biodiversidad, así como de asegurar la continuidad de los servicios ecosistémicos que brindan las ANP. El análisis de la coocurrencia de temáticas alrededor de las ANP arrojó más de 1 000 palabras clave, las cuales integraron 5 clústeres, en los que los temas que destacaron fueron gestión, IS, conservación, turismo sustentable, y recientemente límites planetarios, servicios ecosistémicos, actores clave, cambio climático y conflictos ambientales. Las ANP, aun cuando están concebidas para la protección ambiental, proporcionan servicios ambientales y pueden generar beneficios económicos por actividades como el turismo, el aprovechamiento forestal y otras. En este contexto, los IS proporcionan elementos para cuantificar, monitorear y tomar decisiones sobre el patrimonio natural, abarcando el agua, e incluso para el desarrollo de políticas globales. Existen temas

emergentes que requieren ser más documentados: conflictos socioambientales, aprovechamiento ilegal de recursos naturales, incendios provocados y crimen organizado.

## REFERENCIAS

- Agyeiwaah, E., McKercher, B., & Suntikul, W. (2017). Identifying core indicators of sustainable tourism: A path forward? *Tourism Management Perspectives*, 24, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2017.07.005>
- Aktsoglou, D. & Gaidajis, G. (2020). A Case Study on Environmental Sustainability Assessment of Spatial Entities with Anthropogenic Activities: The National Park of Eastern Macedonia and Thrace, Greece. *Sustainability*, 12(11), 4486. <https://doi.org/10.3390/su12114486>
- Asmantaite, V., Dapkus, R., Karadzic, V., Korneeva, E., & Ghauri, S. P. (2021). Sustainability assessment of national parks. *Transformations in Business & Economics*, 20(1).
- Bennett, N., Roth, R., Klain, S. C., Chan, K., Christie, P., Clark, D., Cullman, G., Curran, D., Durbin, D., Durbin, T., Epstein, G., Greenberg, A., Nelson, M., Sandlos, J., Stedman, R., Teel, T., Thomas, R., Verissimo, D., & Wyborn, C. (2017). Conservation social science: Understanding and integrating human dimensions to improve conservation. *Biological Conservation*, 205, 93-108. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.10.006>
- Binnqüist-Cervantes, G. S., Chávez-Cortés, M. M. y Colín-Castro, G. (2017). Evaluación del programa de conservación y manejo del Parque Nacional Huatulco. *Política y Cultura*, (47), 167-199.
- Bontempi, A., Venturi, P., Del-Bene, D., Scheidel, A., Zaldo-Aubanell, Q., & Zaragoza, R. M. (2023). Conflict and conservation: On the role of protected areas for environmental justice. *Global Environmental Change*, 82, 102740.
- Brundtland, I. (1987). Informe: Nuestro futuro común. Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/xHepD>. Fecha de consulta: 11 de septiembre de 2023.
- Butler, R. (1999). Sustainable tourism: A state-of-the-art review. *Tourism Geographies*, 1(1), 7-25. <https://doi.org/10.1080/14616689908721291>
- Carranza, D. M., Varas-Belemmi, K., De-Veer, D., Iglesias-Müller, C., Coral-Santacruz, D., Méndez, F. A., Torres-Lagos, E., Squeo, F., & Gaymer, C. (2020). Socio-environmental conflicts: An underestimated threat to biodiversity conservation in Chile. *Environmental Science & Policy*, 110, 46-59.
- Choi, H. C. & Sirakaya, E. (2006). Sustainability indicators for managing community tourism. *Tourism Management*, 27(6), 1274-1289. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.05.018>
- Cobián-Rojas, D., Márquez-Llauger, L., Chevalier-Monteagudo, P. P., Perera-Valderrama, S., González-Méndez, J., Caballero-Aragón, H. y Navarro-Martínez, Z. M. (2022). Investigación, monitoreo y manejo para la conservación y uso sostenible de los arrecifes coralinos en el Parque Nacional Guanahacabibes. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 12(2).
- Convention on Biological Diversity (2010). COP10. [En línea]. Disponible en: <https://www.cbd.int/cop10>. Fecha de consulta: 6 de noviembre de 2023.
- Convention on Biological Diversity (2020). Plan estratégico para la diversidad biológica 2011-2020, incluidas las metas AICHI para la diversidad biológica. [En línea]. Disponible en: <https://dev-chm.cbd.int/sp/targets>. Fecha de consulta: 9 de noviembre de 2023.
- Costanza, R., d'Arge, R., De-Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., & Paruelo, J. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 (6630), 253-260.
- Cumming, G. S., Allen, C. R., Ban, N. C., Biggs, D., Biggs, H. C., Cumming, D. H., Graham-Epstein, A., Kristine, M., Mateja, C., & Schoon, M. (2015). Understanding protected area resilience: a multi-scale, social-ecological approach. *Ecological Applications*, 25(2), 299-319. <https://doi.org/10.1890/13-2113.1>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285-296.
- Dudley, N. (2008). Guidelines for applying protected area management categories. IUCN (Ed). [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/yqRH>. Fecha de

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

consulta: 12 de noviembre de 2023.

Eagles, P. (2013). Research priorities in park tourism. *Journal of Sustainable Tourism*, 22(4), 528-549. <https://doi.org/10.1080/09669582.2013.785554>

Fernandes, P. (2022). Natureza, infraestrutura, mineração e urbanização: cartografando interseções históricas na região de Carajás. *Novos Cadernos NAEA*, 25(4).

Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2018). Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios. *Sustainability*, 10(10), 3421. <https://doi.org/10.3390/su10103421>

Hosseini, S., Oladi, J., & Amirnejad, H. (2021). The evaluation of environmental, economic and social services of national parks. *Environment, Development and Sustainability*, 23(6), 9052-9075. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01011-6>

Jamal, T. & Stronza, A. (2009). Collaboration theory and tourism practice in protected areas: stakeholders, structuring and sustainability. *Journal of Sustainable Tourism*, 17(2), 169-189. <https://doi.org/10.1080/09669580802495741>

Khoshnevis-Yazdi, S., Shakouri, B., Salehi, H., & Fashandi, A. (2017). Sustainable development and ecological economics. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 12(8), 740-748. <https://doi.org/10.1080/15567249.2017.1296506>

Kushawaha, J., Borra, S., Kushawaha, A. K., Singh, G., & Singh, P. (2021). Climate change and its impact on natural resources. *Water Conservation in the Era of Global Climate Change*, 333-346. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820200-5.00002-6>

Lee, T. (2013). Influence analysis of community resident support for sustainable tourism development. *Tourism Management*, 34, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2012.03.007>

Levett, R. (1998). Sustainability indicators—integrating quality of life and environmental protection. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, 161(3), 291-302. <https://doi.org/10.1111/1467-985X.00109>

Levrel, H., Kerbirou, C., Couvet, D., & Weber, J. (2009). OECD pressure–state–response indicators for managing biodiversity: a realistic perspective for a French biosphere reserve. *Biodiversity and Conservation*, 18, 1719-1732.

Liverman, D. M., Hanson, M. E., Brown, B. J., & Merideth, R. W. (1988). Global sustainability: toward measurement. *Environmental Management*, 12(2),

133-143. <https://doi.org/10.1007/BF01873382>

Marcelino-Aranda, M., Torres-Ramírez, A., Muñoz-Marcelino, D., & Camacho, A. D. (2020). Profesionalización en la Empresa Familiar: Evolución y líneas de investigación. *Nova Scientia*, 12(25). <https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2508>

Martin-López, B., Palomo, I., García-Llorente, M., Iniesta-Arandia, I., Castro, A. J., Del-Amo, D. G., Gómez, E., & Montes, C. (2017). Delineating boundaries of social-ecological systems for landscape planning: A comprehensive spatial approach. *Land Use Policy*, 66, 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.040>

McAllister, J. T., Lennertz, L., & Atencio-Mojica, Z. (2022). Mapping a discipline: a guide to using VOSviewer for bibliometric and visual analysis. *Science & Technology Libraries*, 41(3), 319-348.

Menton, M., Larrea, C., Latorre, S., Martinez-Alier, J., Peck, M., Temper, L., & Walter, M. (2020). Environmental justice and the SDGs: from synergies to gaps and contradictions. *Sustainability Science*, 15, 1621-1636.

Miller, G. (2001). The development of indicators for sustainable tourism: results of a Delphi survey of tourism researchers. *Tourism Management*, 22(4), 351-362. [https://doi.org/10.1016/S0261-5177\(00\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0261-5177(00)00067-4)

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Prisma Group. (2010). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *International Journal of Surgery*, 8(5), 336-341.

Munasinghe, M. (1993). Environmental economics and biodiversity management in developing countries. *Ambio*, 126-135.

Naciones Unidas (1993). Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/QpAGdc>. Fecha de consulta: 13 de septiembre de 2023.

Naciones Unidas (2015). Objetivos del Desarrollo Sostenible. [En línea]. Disponible en: <https://goo.su/csLq0>. Fecha de consulta: 13 de septiembre de 2023.

Naughton-Treves, L., Buck, M., & Brandon, K. (2005). The role of protected areas in conserving biodiversity and sustaining local livelihoods. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 219-252. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.164507>

OECD, Organization for Economic Co-operation and Development (2001). OECD Environmental statistics, accounts and indicators. [En línea]. Disponible en: <https://www.oecd.org/en/topics/environmental-statistics-accounts-and-indicators.html>. Fecha de consulta: 13 de septiembre de 2023.

Oldekop, J. A., Holmes, G., Harris, W. E., & Evans, K. L. (2015). A global assessment of the social and conservation outcomes of protected areas. *Conservation Biology*, 30(1), 133-141. <https://doi.org/10.1111/cobi.12568>

Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419-422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>

Outhwaite, C. L., McCann, P., & Newbold, T. (2022). Agriculture and climate change are reshaping insect biodiversity worldwide. *Nature*, 605(7908), 97-102.

Parsons, D. J. (1991). Planning for climate change in national parks and other natural areas. *Northwest Environ Journal*, 7(2), 255-269.

Prato, T. (2000). Multiple attribute evaluation of landscape management. *Journal of Environmental Management*, 60(4), 325-337.

Prato, T. (2009). Fuzzy adaptive management of social and ecological carrying capacities for protected areas. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2551-2557.

Prato, T. & Herath, G. (2007). Multiple-criteria decision analysis for integrated catchment management. *Ecological Economics*, 63(2-3), 627-632.

Protected Planet (2020). Protected Planet Report 2020. [En línea]. Disponible en: <https://livereport.protectedplanet.net/>. Fecha de consulta: 7 de noviembre de 2023.

Protected Planet (2024). Protected Areas (WDPA). [En línea]. Disponible en: <https://www.protectedplanet.net/en/thematic-areas/wdpa?tab>About>. Fecha de consulta: 7 de noviembre de 2023.

Raworth, K. (2019). Dollars to doughnuts: The shape of a new economy. *GTI Interview, Great Transition Initiative*. [En línea]. Disponible en: <https://greattransition.org/publication/dollars-doughnuts>. Fecha de consulta: 23 de septiembre de 2023.

Reed, M. S., Fraser, E. D., & Dougill, A. J. (2006). An adaptive learning process for developing and applying sustainability indicators with local communities. *Ecological Economics*, 59(4), 406-418. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.008>

Rockström, J., Edenhofer, O., Gaertner, J., & DeClerck, F. (2020). Planet-proofing the global food system. *Nature Food*, 1(1), 3-5.

Rockström, J., Gupta, J., Qin, D., Lade, S. J., Abrams, J. F., Andersen, L. S., Armstrong, D., Bai, X., Bala, G., Bunn, S., Ciobanu, D., DeClerck, F., Ebi, K., Gifford, L., Gordon, C., Hasan, S., Kanie, N., Lenton, T., Loriani, S., Liverman, D., ..., & Zhang, X. (2023). Safe and just Earth system boundaries. *Nature*, 619(7968), 102-111.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, S., Lambin, E., Lenton, T., Scheffer, M., Folke, C., Joachim, H., Nykvist, B., Wit, C., Hughes, T., Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., ..., & Foley, J. (2009). Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14(2).

Sander, H. A. & Zhao, C. (2015). Urban green and blue: Who values what and where? *Land Use Policy*, 42, 194-209. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.07.021>

Schelhas, J. (1994). Building sustainable land uses on existing practices: Smallholder land use mosaics in tropical lowland Costa Rica. *Society & Natural Resources*, 7(1), 67-84.

Schianetz, K. & Kavanagh, L. (2008). Sustainability indicators for tourism destinations: A complex adaptive systems approach using systemic indicator systems. *Journal of Sustainable Tourism*, 16(6), 601-628. <https://10.1080/09669580802159651>

Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 9(2), 189-212. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>

Steffen, W. & Morgan, J. (2021). From the Paris agreement to the anthropocene and planetary boundaries framework: An interview with Will Steffen. *Globalizations*, 18(7), 1298-1310.

Strickland-Munro, J. K., Allison, H. E., & Moore, S. A. (2010). Using resilience concepts to investigate the impacts of protected area tourism on communities. *Annals of Tourism Research*, 37(2), 499-519. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2009.11.001>

Tanguay, G. A., Rajaonson, J., & Therrien, M. C. (2012). Sustainable tourism indicators: selection criteria for policy implementation and scientific recognition. *Journal of Sustainable Tourism*, 21(6), 862-879. <https://doi.org/10.1080/09669582.2012.742531>

Twining-Ward, L. & Butler, R. (2002). Implementing STD on a Small Island: Development and Use of Sustainable Tourism Development Indicators in Samoa. *Journal of Sustainable Tourism*, 10(5), 363-387. <https://doi.org/10.1080/09669580208667174>

Velasco, C. A. B., Parra, V. F. G. y García, C. Q. (2011). Evolución de la literatura sobre empresa familiar como disciplina científica. *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa*, 14(2), 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.cede.2011.02.004>

Web of Science (2022). Search. [En línea]. Disponible en: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>. Fecha de consulta: 6 de noviembre de 2022.

West, P., Igoe, J., & Brockington, D. (2006). An anthropological perspective on some unexpected consequences of protected areas. *Conservation Biology*, 20(3), 609-618.

WRI, World Resources Institute (1995). Environmental Indicators: a Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development. [En línea]. Disponible en: [http://pdf.wri.org/environmentalindicators\\_bw.pdf](http://pdf.wri.org/environmentalindicators_bw.pdf). Fecha de consulta: 8 de agosto de 2023.

Zander, P. & Kächele, H. (1999). Modelling multiple objectives of land use for sustainable development. *Agricultural Systems*, 59(3), 311-325.



# Metabolitos secundarios en plantas herbáceas de la Huasteca veracruzana, México

## Secondary metabolites in herbaceous plants from the Huasteca veracruzana, Mexico

Lorena Casanova-Pérez<sup>1\*</sup>, Hugo Brígido Barrios-García<sup>2</sup>, Verónica Rosales-Martínez<sup>3</sup>

### RESUMEN

El papel de la agrobiotecnología ha sido fundamental en los últimos años para la búsqueda e implementación de buenas prácticas que conduzcan a una agricultura sustentable. Ello representa una oportunidad para que los metabolitos secundarios, de origen vegetal, sean utilizados en cultivos de interés. El objetivo de esta investigación fue evaluar los metabolitos secundarios asociados a 54 especies de plantas herbáceas identificadas como plantas medicinales en la Huasteca veracruzana, México y su potencial uso en el desarrollo de productos agrobiotecnológicos. Se revisaron fuentes bibliográficas para obtener información sobre el tipo de metabolitos encontrados en cada especie herbácea con uso medicinal identificada en la región, el órgano utilizado y el método de extracción realizada. Se encontró información de 46 especies, de las cuales, el 41 % fue reportada por poseer al menos un grupo funcional de metabolitos secundarios; el 26 % mostró la presencia de dos grupos funcionales, mientras que, el 18 % y el 15 % de las especies poseen tres y cuatro grupos funcionales de metabolitos, respectivamente. Solo 6 de las especies analizadas han sido estudiadas con fines de establecer su potencial uso agrobiotecnológico. Si bien, la mayoría de las plantas se analizan para establecer su potencial empleo farmacológico, esta información es sumamente valiosa porque brinda indicios sobre el potencial de dichas especies y sus metabolitos secundarios como base para la elaboración de productos agrobiotecnológicos, cuyo uso favorezca el manejo sustentable de la agricultura.

**PALABRAS CLAVE:** agricultura, bioproductos, cultivos, seguridad alimentaria, cambio climático.

### ABSTRACT

In recent years, agrobiotechnology has played a pivotal role in the pursuit and implementation of sustainable agricultural practices. This presents a potential opportunity for the utilization of secondary metabolites derived from plants in the cultivation of crops of interest. The objective of this research was to evaluate the secondary metabolites associated with 54 species of herbaceous plants identified as medicinal plants in the Huasteca veracruzana, Mexico, and to assess their potential use in the development of agrobiotechnological products. A review of the bibliographic sources was conducted to obtain information on the type of metabolites found in each herbaceous species with medicinal use identified in the region, the organ used, and the extraction method employed. Information was obtained for 46 species, 41 % of which were reported to possess at least one functional group of secondary metabolites. Additionally, 26 % of the species showed the presence of two functional groups, while 18 % and 15 % of the species possessed three and four functional groups of metabolites, respectively. Only 6 of the analyzed species have been studied with the objective of establishing their potential agrobiotechnological use. While the majority of the plants are analyzed to ascertain their potential pharmacological applications, this information is of significant value as it provides insights into the potential of these species and their secondary metabolites as a foundation for the development of agrobiotechnological products.

**KEYWORDS:** agriculture, bioproducts, crops, food security, climate change.

\*Correspondencia: [lorena.casanova@uthh.edu.mx](mailto:lorena.casanova@uthh.edu.mx)/Fecha de recepción: 28 de abril de 2024/Fecha de aceptación: 11 de octubre de 2024/ Fecha de publicación: 25 de octubre de 2024.

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense, Programa Educativo Agrobiotecnología, carretera Huejutla-Chalahuiyapa s/n, colonia Tepoxteco, Huejutla de Reyes, Hidalgo, México, C. P. 43000. <sup>2</sup>Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia "Dr. Norberto Treviño Zapata", Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, C. P. 87274. <sup>3</sup>Colegio de Postgraduados Campus Campeche, Posgrado en Bioprospección y Sustentabilidad Agrícola en el Trópico, Champoton, Campeche, México, C. P. 24450.

## INTRODUCCIÓN

La Huasteca, es una región cultural en México considerada como un área de alta diversidad biológica, característica asociada a su compleja fisiografía y la presencia de grupos originarios, quienes, por generaciones, han usado diversas especies que forman su patrimonio biocultural (Ávila y González, 1998). Dichas especies tienen diversos usos, siendo los principales, el alimenticio y el medicinal y tienen un gradiente de manejo que va desde aquellas cultivadas hasta las recolectadas, considerándose estas últimas, parte de poblaciones naturales amenazadas por el cambio del uso del suelo y las sequías, situación que puede ocasionar su desaparición en los próximos años (Chávez-Acuña y col., 2022).

Las investigaciones sobre estas plantas, y en particular, sobre sus características fitoquímicas son escasas, puesto que al no ser plantas valoradas, desde una perspectiva económica, han sido excluidas de la agenda científica tecnológica (Osuna, 2015). Sin embargo, resultan un recurso potencial para el desarrollo de productos agrobiotecnológicos destinados al manejo sostenible de la agricultura (Romo-Rico y col., 2022), que puedan ser adquiridos o producidos por los pequeños productores mediante técnicas rústicas, siendo ambos una alternativa desde una perspectiva económica (insumos asequibles y baratos) y ambiental (nulo o limitado impacto negativo al suelo y las fuentes de agua) (Senthil-Nathan y col., 2022).

El desarrollo de bioproductos de origen vegetal requiere, en primer lugar, que las especies de interés sean identificadas botánicamente; posteriormente, debe realizarse la revisión bibliográfica de su uso real y potencial, con base en los metabolitos secundarios que le son inherentes, y por último, su validación en diferentes protocolos de investigación, que permitan la generación y verificación de conocimiento útil en el diseño de productos en caminados a la bioestimulación de cultivos, control de malezas, asimismo, al control y prevención de plagas y enfermedades (Bano y col., 2023).

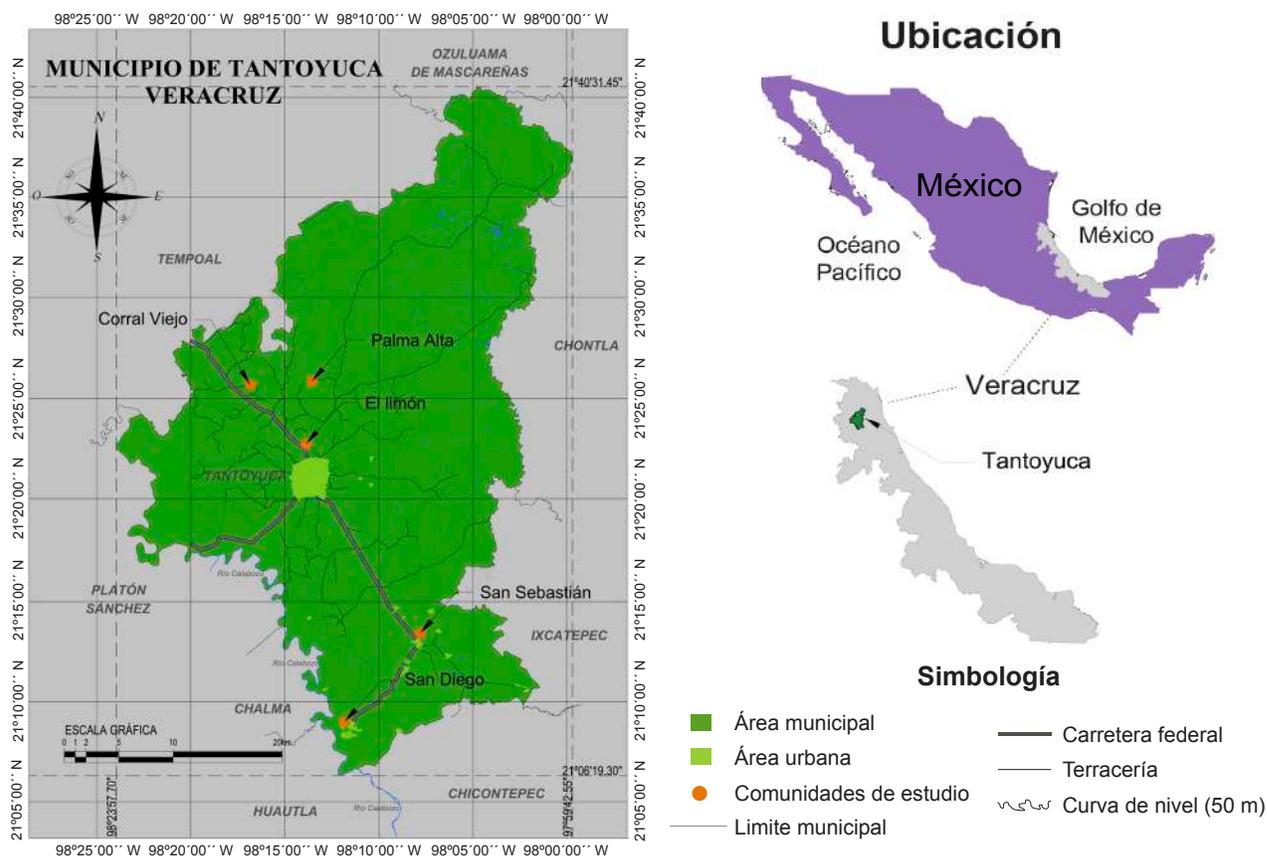
Es importante mencionar que los metabolitos secundarios son compuestos de naturaleza química distinta, y juegan un papel importante en la adaptación al estrés ambiental y en la defensa ante potenciales predadores y patógenos de las plantas (Lustre, 2022), en contraste con los metabolitos primarios, que están implicados en el crecimiento, desarrollo y reproducción del cultivo (azúcares, proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos).

El presente trabajo tuvo como objetivo describir los metabolitos secundarios asociados a 54 especies herbáceas clasificadas como plantas medicinales en la Huasteca de Veracruz, México y su potencial uso en el desarrollo de productos agrobiotecnológicos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación es de carácter cualitativo, basada en la revisión de fuentes secundarias (artículos científicos, capítulos de libro, tesis de licenciatura y posgrado), siendo la continuación de una investigación realizada de julio a diciembre de 2017, en la cual se identificaron botánicamente 158 especies utilizadas como parte de la medicina tradicional en cinco localidades de la Huasteca, específicamente en el municipio de Tantoyuca, Veracruz, México (Casanova-Pérez y col., 2022) (Figura 1).

Del total de especies identificadas, se eligieron 54 especies de plantas clasificadas por su forma biológica como herbáceas, las cuales son obtenidas por la población a partir de la recolección o a través de su cultivo en la parcela o el patio familiar. La búsqueda de información sobre los metabolitos secundarios asociados a cada especie se realizó durante el segundo semestre de 2023. Esto requirió el uso de motores de búsqueda y del uso de conjugaciones de palabras clave como: metabolitos secundarios, el nombre científico de cada especie, caracterización fitoquímica, tamizaje químico, entre otras. De esta búsqueda, se eligieron 54 fuentes. El 87 % fueron investigaciones de carácter experimental y 13 % revisiones de alguna especie en particular.



Fuente: Modificado a partir de INEGI (2009).

■ **Figura 1. Ubicación de las cinco localidades que conforman el área de estudio.**

Figure 1. Location of the five localities included in the study area.

La identificación de los metabolitos secundarios, asociados a cada especie, se realizó con base en su estructura química (terpenos, fenólicos, glicósidos y alcaloides) (Kennedy, 2019). Además, se obtuvo información sobre el órgano utilizado para la extracción de los metabolitos, el tipo de extracción, el país en donde se realizó la investigación. Esta información fue sistematizada y analizada en Excel versión 2016.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revisión bibliográfica permitió obtener información fitoquímica de 46 especies de plantas herbáceas, mientras que de 8 no se obtuvo dicha información: *Hymenocallis americana* Roem., *Rawolfia heterophylla* Roem. & Shult, *Mandevilla subsagittata* (R. & P.) Woods., *Acalypha phleoides* Cav., *Lasiacis ruscifolia* (H.B.K.) Hitch., *Solanum* sp., *Urtica chamaedryoides* Pursh. y *Priva aspera* H.B.K.

De las 48 especies de las que si se obtuvo información, se identificó que en 9 de estas, sus metabolitos secundarios tienen una aplicación en la industria alimentaria, mientras que 30 un uso farmacéutico y únicamente en 5, sus metabolitos secundarios se asociaron a al uso agrobiotecnológico.

En las especies de *Xanthosoma robustum*, *Teloxys ambrosioides*, *Tagetes erecta*, *Capsicum annum*, *Solanum torvum* y *Euphorbia hypericifolia* (Tabla 1), se abordó su uso agrobiotecnológico, con temas como la capacidad de los metabolitos secundarios como biofungicidas, bioplaguicidas, biobactericidas y bioproductos capaces de inhibir malezas. En 30 especies se tuvo como propósito evaluar su capacidad antioxidante, antidiabética, hepatoprotectora, anti-nociceptiva, antiinflamatoria, neuroprotectora y cardioprotectora, entre otras (Nirmala y col., 2022). Hallazgos valiosos desde el enfoque de

■ Tabla 1. Información general sobre las especies herbáceas y sus metabolitos secundarios asociados según diversas fuentes.

Table 1. General information on herbaceous species and their associated secondary metabolites according to various sources.

Nombre científico	Nombre común	Objetivo de la investigación	Órgano de la planta	Método de extracción	País del estudio	Autores
<b>Adiantaceae</b>						
<i>Adiantum amplum</i> 	Corazón	Identificar propiedades antimicrobianas para un posible uso farmacéutico (tratamiento contra enfermedades gastrointestinales y de las vías respiratorias ocasionadas por <i>Escherichia coli</i> y <i>Staphylococcus aureus</i> )	Fronδας y rizomas + raíces	Extracción hexánica, acetato de etilo, metanólica y acuosa	México	Montoya (2022)
<b>Araceae</b>						
<i>Xanthosoma sagittifolium</i> Schott 	Malanga	Evaluar la composición físico-química, perfil fitoquímico y biológico (potencial uso en procesos alimentarios)	Hojas, tallos y rizomas	Extracción etanólica y acuosa	Camerún	Omokolo y col. (2005)
		Evaluar capacidad de metabolitos secundarios producidos por las plantas de esa especie ante la presencia de <i>Staphylococcus aureus</i> (potencial uso alimentario)	No aplica	No aplica	Brasil	Silva y col. (2006)
<i>Xanthosoma robustum</i> Schott* 	Hoja elegante	Evaluar actividad antifúngica en 20 hongos fitopatógenos para potencial uso agrobiotecnológico	Tubérculo	Extracción etanólica y acuosa	México	Estrada y col. (2005)
<b>Boraginaceae</b>						
<i>Heliotropium angiospermum</i> Murray 	Cola de alacrán	Identificar metabolitos bioactivos y su capacidad antimicrobial, antioxidante y antiinflamatoria para uso farmacéutico	Hojas	Extracción etanólica y acuosa	México	Erosa-Rejón y col. (2009)

Continúa...

<i>Tournefortia hirsutissima</i> L. 	Venado de tres cabezas	Evaluar actividad biológica sobre gusano cogollero ( <i>Spodoptera frugiperda</i> )	Hojas	Extracción hexánica, diclorometano, metanólica y acuosa	México	Lucena (2020)
<b>Chenopodiaceae</b>						
<i>Teloxys ambrosioides</i> (L.) W. A. Weber* 	Epazote	Determinar actividad fumigante ( <i>Sitophilus zeamais</i> ), antifúngica ( <i>Fusarium oxysporum</i> ) y anti-oxidante para uso agrobiotecnológico	Hojas	Extracción acuosa	Colombia	Jaramillo y col. (2012)
<b>Compositae</b>						
<i>Parthenium hysterophorus</i> L. 	Chuchoyate	Caracterizar fitoquímicamente la especie y su capacidad antioxidante, particularmente, en el tratamiento de enfermedades gastrointestinales	Hojas	Extracción etanólica	Ecuador	Echavarría y col. (2016)
<i>Artemisia ludoviciana</i> ssp. Mexicana Willd. 	Estafiate	Caracterizar fitoquímicamente la especie (potencial uso farmacéutico)	Hojas	Extracción etanólica	México	Ruiz-Cancino y col. (1993)
<i>Tagetes erecta</i> L.* 	Flor de muerto	Identificar la actividad insecticida en <i>Spodoptera frugiperda</i> (uso agrobiotecnológico)	Tallos y hojas	Extracción etanólica y de acetato de etilo	Brasil	Feng y col. (2018)
		Identificar capacidad bioactiva de metabolitos secundarios a través de secuencias genómicas y transcriptómicas para su potencial uso farmacéutico	Hojas, flores maduras e inmaduras	Al material se le aplicó nitrógeno líquido para después ser secuenciado transcrip-tomicamente	China	Santos y col. (2022)
<i>Tridax procumbens</i> L. 	Hierba del corazón	Identificar actividad antiinflamatoria de los metabolitos secundarios para su potencial uso farmacéutico	Hojas y flores	Extracción metanólica	India	Devi y col. (2022)
<i>Erigeron pubescens</i> H. B. K. 	Llave de pagazo	Evaluar capacidad insecticida sobre <i>Sitophilus zeamais</i>	Hojas y flores	No aplica (el material fue únicamente deshidratado)	México	Juárez-Flores y col. (2010)

Continúa...

<i>Porophyllum ruderale</i> (Jacq.) Cass. Subsp. <i>Macrocephalum</i> ■	Mesis	Evaluar actividad antioxidante y presencia de compuestos de origen fenólico para su potencial uso farmacéutico (uso para infecciones bacterianas y fúngicas en el ser humano)	Hojas	Extracción metanólica	México	Tabarez (2019)
<i>Sclerocarpus uniserialis</i> (Hook.) Benth. & Hook. ■	Mozote amarillo	Evaluar capacidad insecticida sobre <i>Sitophilus zeamais</i>	Hojas y flores	No aplica (el material fue vegetal fue únicamente deshidratado)	México	Juárez-Flores y col. (2010)
<i>Bidens odorata</i> Cav. ■	Mozote blanco	Analizar fitoquímicamente extractos aéreos para actividades antimicrobianas e hipolipemiante (cardioprotector)	Brotos aéreos	Extracción etanólica y acuosa	México	Hernández-Sánchez y col. (2018)
<i>Vernonia greggii</i> Gray ■ ■	Quichín morado	Evaluar actividad antibacteriana y antimicótica <i>in vitro</i> para su potencial uso farmacéutico	Hojas	Extracción etanólica	Guatemala	Canel (2012)
<i>Tagetes lucida</i> Cav ■	Pericón	Identificación de las características antinociceptivas para uso farmacéutico (tratamiento del dolor)	Hojas	Extracción etanólica	México	González-Trujano y col. (2019)
<b>Commelinaceae</b>						
<i>Tradescantia cf. Pallida</i> (Rose) Hunt ■	Matlalina	Evaluar la actividad microbiana contra microorganismos de interés médico ( <i>Fusarium oxysporum</i> )	Hojas, tallo y flor	Extracción metanólica	México	Morales (2018)
<b>Crassulaceae</b>						
<i>Kalanchoe pinnata</i> (Lamb) Pers ■	Tronadora	Identificar compuestos fenólicos y antioxidantes con fines farmacéuticos (estrés oxidativo y proceso inflamatorio)	Hojas	Extracción acuosa	México	Navarro y col. (2023)

Continúa...

Euphorbiaceae						
<p><i>Phyllanthus acuminatus</i> Vahl</p> 	Hierba de la campana	Determinar condiciones óptimas de cultivo líquido para las raíces pilosas y potenciar la presencia de metabolitos. Uso antibacterial y antiviral para uso farmacéutico	Raíces	Medio de cultivo <i>in vitro</i>	Costa Rica	Pérez-Méndez y col. (2022)
<p><i>Euphorbia hypericifolia</i> (L.) Link.*</p> 	Gavilancillo	Determinar su capacidad alelopática como bioherbida (uso potencial agrobiotecnológico)	Hojas, tallo y raíces	Extracción acuosa	Camerún y Japón	Ndam y col. (2021)
<p><i>Pedilanthus</i> sp</p> 	Picito de virgen	Evaluar diterpenoides y su capacidad como precursores biogénicos para la reversión de la resistencia a fármacos	Hojas	Extracción etanólica	China	Zhang y col. (2022)
Gramineae						
<p><i>Zea mays</i> L.</p> 	Maíz	Evaluar su capacidad antimicótica ( <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus flavus</i> y <i>Aspergillus brasiliensis</i> ), bactericida y antioxidante	Estigmas de maíz deshidratadas	Extracción etanólica	India	Abirami y col. (2021)
<p><i>Cymbopogon citratus</i> (DC) Stapf</p> 	Zacate limón	Analizar el potencial antidiabético de los flavonoides y glicósidos de esta especie	Hojas	Extracción metanólica	Portugal	Borges y col. (2021)
		Actividad antibiopelícula contra <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Staphylococcus epidermidis</i> en pacientes con rinosinusitis	Tallo	Extracciones acuosa, etanólica y metanólica	Tailandia	Kho-sakueng y Taweechai-supapong (2024)

Continúa...

Labiatae						
<i>Ocimum basilicum</i> L. ■	Albahacar	Identificar fuente potencial para la obtención de eugenol (terpeno), para fines terapéuticos (uso antiséptico y anestésico)	Hojas, tallos, inflorescencias y raíces.	Extracciones acuosa, etanólica y metanólica	Korea	Bhuvaneshwari y col. (2016)
<i>Menta citrata</i> Ehrh. ■	Hierba buena	Identificar metabolitos secundarios (monoterpenos y sesquiterpenos para uso potencial alimentario)	Tallo, hojas y flores	Cromatógrafo de gases	Algeria	Ouakouak y col. (2019)
<i>Hyptis verticillata</i> Jacq. ■ ■ ■	Hierba del negro	Analizar la actividad fitoquímica y farmacobiológica vinculada a la especie (potencial uso antiinflamatorio; antibacteriano, antifúngico, antiviral, anti-VIH, antisecretor y hepatoprotector)	<i>Review</i>	<i>Review</i>	Estados Unidos	Picking y col. (2013)
<i>Salvia coccinea</i> Juss. Ex Murr. ■ ■	Mirto rojo	Analizar el progreso de la investigación sobre las características fitoquímica, bioactividad, filogenia y antiósmica de la especie	<i>Review</i>	<i>Review</i>	China	Hao y col. (2015)
<i>Ocimum micranthum</i> Will. ■	Talachín	Caracterizar fitoquímicamente la especie e identificar los metabolitos secundarios presentes para su uso farmacéutico potencial (identificación de compuestos bioactivos para ser utilizados en nutraceúticos para mejorar la salud humana)	Hojas	Extracciones con acetona, acuosa, diclorometano, etanol, hexánica y metanólica	India	Priya y Serva (2023)
Leguminosae						
<i>Arachis hypogaea</i> L. ■	Cacahuete	Evaluar capacidad antioxidante (potencial uso alimentario)	Semillas	Extracción metanólica	USA	Duncan y col. (2006)

Continúa...

<i>Dalea aff. Bicolor</i> Humb. & Bonpl. Ex. Willd. 	Carga-sereno	Evaluar actividad antibacteriana in vitro sobre bacterias de importancia en salud pública (infecciones provocadas por <i>Streptococcus mutans</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> y <i>Bacillus subtilis</i> )	Follaje	Extracción hidroalcohólica	México	Morales-Ubaldo y col. (2022)
<b>Liliaceae</b>						
<i>Allium glandulosum</i> Link & Otto 	Chunacate	Identificación de metabolitos secundarios para el tratamiento antiinflamatorio y del sistema inmune	Follaje	Extracción con levadura	Japón	Zhao y col. (2004)
		Evaluar capacidad antibacterial ( <i>Bacillus cereus</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Pseudomonas syringae</i> pv. Actinidae), fines farmacéuticos	Follaje	Extracción metanólica	China	Chen y col. (2022)
<i>Allium cepa</i> L. 	Cebolla	Evaluar método de extracción de flavonoides para uso alimentario	Cáscara	Extracción metanólica	México	Fajardo-Romero y col. (2016)
<b>Malvaceae</b>						
<i>Sida acuta</i> Burm. 	Malva	Caracterización química de metabolitos secundarios y su potencial uso farmacéutico (cáncer, antioxidante e inhibidor enzimático)	Follaje	Extracciones metanólica y acuosa	Turquía, Bulgaria, Costa de marfil y Mauritania	Uysal y col. (2021)
<b>Martyniaceae</b>						
<i>Martynia annua</i> L. 	Uña de gato	Evaluar actividad antibacteriana y antidiabética (uso potencial farmacéutico)	Follaje	Extracción metanólica	India	Alrabie y col. (2023)
<b>Musaceae</b>						
<i>Musa paradisiaca</i> L. 	Plátano largo	Evaluar actividad antihelmíntica para uso farmacéutico	Hojas y tallo	Extracciones acuosa, metanólica y condiclorometano	Francia	Marie-Magdeleine y col. (2014)

Continúa...

<p><i>Musa paradisiaca</i> L.</p> 	Plátano largo	Evaluar actividad antibacterial para uso farmacéutico (enfermedades provocadas por <i>Staphylococcus aureus</i> )	Hojas	Extracción etanólica	Malasia	Siva-samugham y col. (2021)
<b>Nyctaginaceae</b>						
<p><i>Mirabilis jalapa</i> L.</p> 	Maravilla	Evaluar metabolitos secundarios para su potencial uso en enfermedades neurodegenerativas, cáncer y cardiopatías coronarias	Corteza, hoja y raíces	Extracción metanólica	India	Zachariah y col. (2011)
		Evaluar actividad antioxidante para uso farmacéutico (potencial tratamiento del cáncer de hígado por deficiencia de hierro)	Flores	Extracción etanólica	Indonesia	Suselo y col. (2023)
<b>Papaveraceae</b>						
<p><i>Argemone ochroleuca</i> Sweet/mexicana</p> 	Chicalote o tzolich	Caracterización química y farmacológica de la especie (uso potencial para el tratamiento del COVID-19)	<i>Review</i>	<i>Review</i>	India	Brahmachari y col. (2013)
<b>Portulacaceae</b>						
<p><i>Talinum paniculatum</i> (Jacq.) Gaertn.</p> 	Hierba de ajolote o quelite	Investigación etnofarmacológica de las propiedades cardiorrenales	Hojas y tallos	Extracción etanólica	Brasil	Lima y col. (2019)
		Evaluar método de incremento de saponina mediante ingeniería metabólica	Hojas	Extracción etanólica	India	Afifah y col. (2023)
<b>Phytolaccaceae</b>						
<p><i>Rivina humilis</i> L.</p> 	Hierba mora o baja tripa	Analizar las estructuras de los metabolitos secundarios contenidos en el estudio químico de la fracción apolar del extracto metanólico de las hojas	Hojas	Extracción metanólica	México	Hernández y col. (2022)

Continúa...

<i>Petiveria alliacea</i> L. 	Hierba de zorrillo o pasan	Describir propiedades fitoquímicas y farmacológicas de la especie (tratamiento del sistema nervioso central, anestésico)	<i>Review</i>	<i>Review</i>	Brasil	Luz y col. (2016)
<b>Shizaeaceae</b>						
<i>Lygodium venustum</i> Swartz 	Tepante-pazole	Identificar la composición fenólica, citotóxica y actividades antinoceptiva (tratamientos asociados con el manejo del dolor)	Frondas	Extracción metanólica	Brasil	Morais-Braga y col. (2013)
<b>Solanaceae</b>						
<i>Capsicum annum</i> L. var. <i>Glabriusculum</i> (Dunal) Heiser & Pickersgill* 	Chile de árbol	Evaluar actividad antimicrobiana para potencial uso agrobiotecnológico	Fruto	Extracción metanólica	México	Vargas (2014)
<i>Solanum torvum</i> Swartz* 	Prendedora	Evaluar propiedades bactericidas para su potencial uso agrobiotecnológico	Fruto	Extracción acuosa	India	Vanti y col. (2019)
<b>Tectariaceae</b>						
<i>Tectaria heracleifolia</i> (Willd.) Underw. 	Patita	Evaluar propiedades hipoglucémicas para su potencial uso farmacológico (diabetes)	Hojas	Extracción acuosa	México	Luna-Rodríguez y col. (2022)
<b>Verbenaceae</b>						
<i>Lippia dulcis</i> Trev. 	Hierba dulce	Evaluar capacidad de biosíntesis para potencial uso alimentario	Hojas tiernas	Extracción con diclorometano	Canadá	Hurd y col. (2017)
<b>Zingiberaceae</b>						
<i>Costus mexicanus</i> Liemb. 	Caña de jabalí	Realizar tamizaje fitoquímico e identificar capacidad analgésica y antiinflamatoria para fines farmacológicos	Hojas y tallos	No aplica, se realizó decocción	Cuba	Morón y col. (2008)

\*Con potencial uso agronómico  Terpenos  Compuestos fenólicos  Glicósidos  Alcaloides

estudio farmacéutico, pero que indirectamente brindan información sobre las posibilidades de uso de estas especies y sus metabolitos asociados en la agrobiotecnología (Tabla 1). Si bien, estos datos son alentadores, también evidencian la escasa exploración sobre el uso específico de estas biomoléculas, incluyendo su capacidad potencial como antivirales, antinematocidas, antibacterianos, antifúngicos, repelentes, bioestimulantes, antioxidante, o como promotores de la tolerancia ante la sequía, como lo sugieren estudios recientes (Chávez-Arias y col., 2022) (Tabla 2).

En cuanto al órgano de la planta usado en las investigaciones revisadas, en el 63.04 % de los casos se utilizaron hojas, 19.56 % tallos y 17.39 % flores o parte de ellas (estigmas). No obstante, se requieren más investigaciones sobre órganos como frutos, raíces, bulbos, incluso la savia, puesto que la presencia y concentración de metabolitos secundarios puede diferir entre éstos (Loza-Cornejo y col., 2017).

La identificación y extracción de metabolitos secundarios en cada especie está influenciada por los métodos de extracción (Geller-McGrath y col., 2023). Matrose y col. (2021) plantean

que las diferentes técnicas, incluido el solvente utilizado, influyen en la posibilidad de obtención o no de ciertos metabolitos secundarios que pudieran estar presentes en una especie. Por tanto, la información presentada en la Tabla 1, si bien, resulta valiosa, deberá considerarse bajo estas limitaciones.

La revisión bibliográfica también mostró que, 41 % de las especies tuvieron al menos un tipo de metabolito (Tabla 1), 26 % únicamente 2, 18 % mostraron la presencia de 3, mientras que el 15 % de éstas tuvieron los cuatro tipos. El tipo de metabolito secundario más abundante, en las especies vegetales involucradas en esta revisión, fueron los compuestos fenólicos (78 %), después los terpenos (50 %), seguidos de los glicósidos (41 %), y en menor cantidad los alcaloides (37 %).

Las especies *Adiantum amplum*, *Parthenium hysterophorus*, *Euphorbia hypericifolia*, *Mirabilis jalapa*, *Solanum torvum*, *Tectaria heracleifolia* y *Zea mays*, presentaron los cuatro grupos de metabolitos secundarios (Tabla 2).

*Teloxys ambrosioides* y *Sclerocarpus uniserialis*, y otras especies, se asociaron solamente a

■ **Tabla 2. Función ecológica principal de los metabolitos secundarios y su aportación potencial al manejo sustentable de la agricultura.**

Table 2. Main ecological function of secondary metabolites and their potential contribution to sustainable agricultural management.

Propiedades	Metabolitos secundarios			
	Terpenos	Compuestos fenólicos	Glicósidos	Alcaloides
Antibacteriana	*	*		*
Antifúngica	*	*		*
Antiviral		*	*	
Antinematocida		*		
Protección contra herbívoros e insectos	*	*	*	*
Bioestimulante	*		*	
Antioxidante		*	*	
Tolerancia a sequía	*	*		

Fuente: Modificado a partir de Chomel y col. (2016) y Lustre (2022).

la presencia de terpenos; mientras que especies como *Tridax procumbens* y *Porophyllum ruderale* fueron reportadas únicamente con compuestos fenólicos. *Bidens odorata* y *Cymbopogon citratus* registraron presencia de glicósidos, en tanto que, *Phyllanthus acuminatus*, *Lygodium venustum* y *Martynia annua*, entre otras especies, contaron con presencia de alcaloides, además de otros metabolitos secundarios.

Los terpenos actúan en las plantas como atraentes para los polinizadores, pero también como disuasorios tóxicos, evitando el daño a las plantas por parte de organismos fitopatógenos (Kennedy, 2019). En el grupo de los terpenos se ubican los esteroides, esteroides, tocoferoles, y terpenoides, considerados como fitohormonas porque estimulan el crecimiento y desarrollo de la planta. Caso particular son los brasinoesteroides, reguladores de crecimiento que, al igual que otras fitohormonas, son producto del metabolismo secundario, pero actúan como metabolitos primarios. Hernández y García-Martínez (2016) indican que, los brasinoesteroides influyen sobre la germinación, la rizogénesis, la floración, la senescencia, la abscisión y en los procesos de maduración del fruto. Asimismo, los carotenoides, en investigaciones recientes están siendo asociados con la tolerancia de las plantas ante el cambio climático (Sun y Fernie, 2023).

En relación a los compuestos fenólicos, estos permiten a una planta herida defenderse del ataque de hongos o bacterias, ya que pueden evitar la generación de proteínas y elementos vitales para estos patógenos (Martin, 2017); además, su presencia en las plantas está relacionada con los colores rojo, naranja, azul, púrpura o violeta en frutas y hortalizas y su capacidad antioxidante (Zárate-Martínez y col., 2021). Entre los compuestos fenólicos destacan las cumarinas, metabolitos secundarios que protegen a las plantas, ya que suprimen el apetito de los insectos que las consumen, pudiendo provocar daños en órganos vitales (Amaral y col., 2015). Otros compuestos fenólicos son los flavonoides y las antraquinonas,

a los cuales se les atribuyen actividades fungicidas y antibacterianas (Estrada y col., 2005).

Los glicósidos son un grupo de metabolitos secundarios que también ha sido poco explorado para su uso agrobiotecnológico. Son importantes por su toxicidad ante insectos, porque inhiben la producción de trehalasa, una enzima clave que controla la disponibilidad de glucosa en sus cuerpos, además, pueden promover la producción de nódulos en bacterias nitro fijadoras como las del género *Rizobium* (Silva y col., 2006). Se ha reportado que, los son sintetizados a partir de aminoácidos y sus derivados tienen la capacidad de inhibir patógenos (Quian y col., 2023), entre ellos, algunos hongos que atacan hortalizas como las solanáceas (Bressan y col., 2024). Es importante mencionar que, en las 46 especies involucradas en el estudio, no se identificó la presencia de monofenoles, polifenoles, fenoles carboxílicos, ácidos fenólicos o de polifenoles flavonoides como las antocianinas.

Yadav y col. (2021) analizaron las plantas y su capacidad de biosíntesis de diferentes tipos de metabolitos secundarios que las protegen de la peroxidación lipídica y otros daños oxidativos bajo estrés por sequía. También se han estudiado los metabolitos secundarios volátiles y su papel en el alertamiento de los tejidos de las plantas para que alcancen procesos defensivos de mitigación del estrés por sequía (Soubedi y col., 2023). Ghasemi y col. (2023) señalaron que, especies expuestas a este fenómeno agrometeorológico tuvieron un aumento significativo de los niveles de betacaroteno, licopeno, terpenos, antocianina, compuestos fenólicos, flavonoides y alcaloides, lo que indica un cambio metabólico adaptativo en respuesta a condiciones adversas.

## CONCLUSIONES

Las plantas medicinales utilizadas actualmente en contextos locales, son un recurso fitogenético con potencial agrobiotecnológico, como en el presente estudio, donde el 13 % de las especies analizadas reportaron esta característica, la cual, puede favorecer a través del

aprovechamiento de sus metabolitos secundarios, el desarrollo de prácticas de manejo para una agricultura sustentable. La extracción y utilización de estas biomoléculas, representan un gran potencial en la elaboración de bioproductos destinados a la prevención y control de plagas, enfermedades, bioestimulación y, con base en resultados de estudios recientes, en la tolerancia de algunas especies de plantas ante condiciones de sequía. Es importante que, al estudiar a profundidad dicho potencial, se considere la compleja biosíntesis de estos metabolitos secundarios en las plan-

tas y su alta especificidad en algunas especies. Se recomienda el desarrollo y establecimiento de protocolos de investigación para cada una de las especies involucradas, que contemplen el uso de diferentes órganos y métodos de extracción óptimos, que conduzcan a la elaboración y evaluación de bioproductos que sean eficaces y asequibles para los agricultores en el mediano plazo.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

## REFERENCIAS

- Abirami, S., Priyalakshmi, M., Soundariya, A., Samrot, A. V., Saigeetha, S., Emilin, R. R., Dhiva S., & Inbathamizh, L. (2021). Antimicrobial activity, antiproliferative activity, amylase inhibitory activity and phytochemical analysis of ethanol extract of corn (*Zea mays* L.) silk. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100089. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100089>
- Affah, I. Q., Wibowo, I., & Ahmad, F. (2023). A newly identified B-amyrin synthase gene hypothetically involved in oleanane-saponin biosynthesis from *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaerth. *Helyon*, 9(7), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17707>
- Alrabie, A., Al-Rabie, N. A., Al-SAeedy, M., Al-Adhrai, A., Al-Qadisy I., & Farooqui, M. (2023). *Martynia annua* safety and efficacy: heavy metal profile in silico and in vitro approaches on antibacterial and antidiabetic activities. *Formerly Natural Product Letters*, 37(6), 1016-1022. <https://doi.org/10.1080/14786419.2022.2097227>
- Amaral, A. F., Jühlinch, L. M., Takeuti, K. L., Rolim, V. M., Goncalves, M. A., Da-Cruz, A. S., Driemeier, D., & De-Barcellos, D. E. (2015). Outbreak of coumarin poisoning in suckling piglets. *Acta Scientiae Veterinariae*, 43, 1-9. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/vti-13964>
- Ávila, A. y González, Á. (1998). Diagnóstico regional de La Huasteca. Proyecto Perfiles Indígenas de México. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://www.academica.org/salomon.nahmad.sitton/20.pdf>. Fecha de consulta: 13 de febrero de 2024.
- Bano, A., Qadri, T. A., & Khan, M. N. (2023). Bioactive metabolites of plants and microbes and their role in agricultural sustainability and mitigation of plant stress. *South African Journal of Botany*, 159, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.05.049>
- Bhuvaneshwari, K., Gokulanathan, A., Jayanthi, M., Govindasamy, V., Milella, L., Lee, S., Yang, D. C., & Girija, S. (2016). Can *Ocimum basilicum* L. and *Ocimum tenuiflorum* L. *in vitro* culture be a potential source of secondary metabolites? *Food Chemistry*, 194, 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.136>
- Borges, P. H. O., Pedreiro, S., Baptista, S. J., Geraldés, C. F. G. C., Batista, M. T., Silva, M. M. C., & Figueirinha, A. (2021). Inhibition of  $\alpha$ -glucosidase by flavonoids of *Cymbopogon citratus* (DC) Stapf. *Journal of Ethnopharmacology*, 280, 114470. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2021.114470>
- Brahmachari, G., Gorai, D., & Roy, R. (2013). Argemone mexicana: Chemical and pharmacological aspects. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 23(3), 559-575. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2013005000021>
- Bressan, S., Kutscher, M., Marquez, R., Centero, P. R., Correia, P. P., Das-Chagas, D., Loiola, O. D., Dos-Reis, A., Osório, R., & Brum M. (2024). Screening of alkaloids and withanolides isolated from Solanacea plants for antifungal properties against non-wild tupe *Sporothrix brasiliensis*. *Journal of Medical Mycology*, 34(1), 101451. <https://doi.org/10.1016/j.mycmed.2023.101451>
- Canel, Y. (2012). Actividad microbiana y antimicrobiana de los extractos de cinco plantas del género *Vernonia* nativas del sur-occidente de Guatemala. [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.usac.edu>

gt/tesis/06/06\_3225.pdf. Fecha de consulta: 11 de enero de 2024.

Casanova-Pérez, C., Delgado-Caballero, C. E., Cruz-Bautista, P. y Casanova-Pérez, L. (2022). Plantas medicinales usadas por los Tének en la Huasteca, México. *CienciaUAT*, 16(2), 40-58. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i2.1576>

Chávez-Acuña, I. J., Flores-Flores, J. L., Domínguez-Cortinas, G. y Chávez-García, E. (2022). Percepción social del papel de la variabilidad y el cambio climático sobre los sistemas socio-ecológicos en comunidades indígenas y mestizas de la Huasteca Potosina en México. *Estudios Sociales*, 32(59), 1-35. <https://doi.org/10.24836/es.v32i59.1179>

Chávez-Arias, C. C., Ramírez-Godoy, A., & Restrepo-Díaz, H. (2022). Influence of drought, high temperatures, and/or defense against arthropod herbivory on the production of secondary metabolites in maize plants. A review. *Current Plant Biology*, 32, 100268. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2022.100268>

Chen, X. M., Lu W., Zhang, Z. H., Zhang, J. Y., Luong, T. M., Lio L., Kim, Y. H., Li, C. H., & Gao, J. M. (2022). Cassane diterpenoids from the aerial parts of *Caesalpinia pulcherrima* and their antibacterial and anti-glioblastoma activity. *Phytochemistry*, 196, 113082. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.113082>

Chomel, M., Guittonny-Larchevêque, M., Fernandez, C., Gallet, C., Des-Rochers, A., Paré, D., & Baldy, V. (2016). Plant secondary metabolites: a key driver of litter decomposition and soil nutrient cycling. *Journal of Ecology*, 104(6), 1527-1541. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12644>

Devi, K., Soni S., Tripathi, V., Pandey, R., & Moharana, B. (2022). Ethanolic extract of *Tridax procumbens* mitigates pulmonary inflammation via inhibition of NF- $\kappa$ B/p65/ERK mediated signalling in an allergic asthma model. *Phytomedicine*, 99, 154008. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2022.154008>

Duncan, C. E., Gorbet, D. W., & Talcott, S. T. (2006). Phytochemical content and antioxidant capacity of water-soluble isolates from peanuts (*Arachis hypogaea* L.). *Food Research International*, 39(8), 898-904. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.05.009>

Echavarría, A., D'Armas, H., Matute, N., Jaramillo, C., Rojas, L. y Benítez, R. (2016). Evaluación de la capacidad antioxidante y metabolitos secundarios de extractos de dieciséis plantas medicinales. *Revista Ciencia Unemi*, 9(20), 29-35. <https://www.re>

[dalyc.org/pdf/5826/582663826005.pdf](https://doi.org/10.29059/cienciauat.v19i2.1910)

Erosa-Rejón, G., Peña-Rodríguez, L. M., & Sterner, I. O. (2009). Secondary metabolites from *Heliotropium angiospermum*. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 53(2), 44-47. <https://www.redalyc.org/pdf/475/47512080003.pdf>

Estrada, E., Ordoñez, P. y Morales, O. (2005). Validación de la actividad antifúngica del tubérculo de *Xanthosoma robustum* y determinación de metabolitos secundarios responsables de la actividad. *Revista Científica*, 9(1), 25-29. <https://doi.org/10.54495/Rev.Cientifica.EdicionEspecial2005.198>

Fajardo-Romero, A., Arroyo-Rivera, A. y Ramírez-Navas, J. S. (2016). Extracción de flavonoides de la envoltura externa de cebolla roja (*Allium cepa*). *UG Ciencia*, 11, 119-126. <https://doi.org/10.18634/ugej.22v.1i.599>

Feng, G., Huang, S., Liu, Y., Xiao, F., Liu, J., Zhang, Z., Chen, Q., Cao, Y., Chen, D., Zhou, Y., Liu, G., Liu, Y., & Niu, X. (2018). The transcriptome analyses of *Tagetes erecta* provides novel insights into secondary metabolite biosynthesis during flower development. *Gene*, 660, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2018.03.051>

Geller-McGrath, D., Mara, P., & Taylor, G. T. (2023). Diverse secondary metabolites are expressed in particle-associated and free-living microorganisms of the permanently anoxic Cariaco Basin. *Nature Communications*, 14, 656. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36026-w>

Ghasemi, S., Kumleh, H., Kordrostami, M., & Rezadoost, M. H. (2023). Drought stress-mediated alterations in secondary metabolites and biosynthetic gene expression in cumin plants: Insights from gene-specific and metabolite analyses. *Plant Stress*, 10, 100241. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100241>

González-Trujano, M. E., Gutiérrez-Valentino, C., Hernández-Arámburo, M., Díaz-Reval, M. I., & Peñalicer, F. (2019). Identification of some bioactive metabolites and inhibitory receptors in the antinociceptive activity of *Tagetes lucida* Cav. *Life Sciences*, 231(15), 116523. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2019.05.079>

Hernández, E. y García-Martínez, I. (2016). Brasiñoesteroides en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 41-50. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i2.356>

Hernández, M. R., Méndez, L., & Aguilar, A. A.

- (2022). Contribution to the chemical study of *Rivina humilis*. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(3), 2603-2613. <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/download/50032/37640/124975>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Tantoyuca, Veracruz de Ignacio de la Llave. [En línea]. Disponible en: [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/30/30155.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30155.pdf). Fecha de consulta: 21 de julio de 2024.
- Hao, D. C., Gu, X. J., & Xiao, P. G. (2015). Phytochemical and biological research of *Salvia medicinal* resources. *Medicinal Plants*, 14, 587-639. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100085-4.00014-1>
- Hurd, M. C., Kwon, M., & Ro, D. K. (2017). Functional identification of a *Lippia dulcis* bornyl diphosphate synthase that contains a duplicated, inhibitory arginine-rich motif. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 490(3), 963-968. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2017.06.147>
- Jaramillo, B. E., Duarte, E. y Delgado, W. (2012). Bioactividad del aceite esencial de *Chenopodium ambrosioides* colombiano. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 17(1), 54-64. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1028-47962012000100006&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962012000100006&lng=es&tlng=es).
- Juárez-Flores, B. I., Jasso-Pineda, Y., Aguirre-Rivera, J. R. y Jasso-Pineda, I. (2010). Efecto de polvos de Asteráceas sobre el gorgojo del maíz (*Sitophilus Zeamais* Motsch). *Polibotánica*, 30, 123-135. <https://core.ac.uk/download/pdf/288192163.pdf>
- Kennedy, D. (2019). Plant-derived phytochemicals to enhance cognitive function and alertness. *Sports Science Exchange*, 29(193), 1-5. [https://www.gssiweb.org/docs/librariesprovider9/sse-pdfs/sse\\_193\\_fitoquimicos\\_derivados\\_plantas.pdf?sfvrsn=2](https://www.gssiweb.org/docs/librariesprovider9/sse-pdfs/sse_193_fitoquimicos_derivados_plantas.pdf?sfvrsn=2)
- Khosakueng, M. & Taweechaisupapong, S. (2024). *Cymbopogon citratus* L. essential oil as a potential anti-biofilm agent active against antibiotic-resistant bacteria isolated from chronic rhinosinusitis patients. *Biofouling*, 29, 1-14. <https://doi.org/10.1080/08927014.2024.2305387>
- Lima, S. E., Calloi, R. A., Signor, C. A., Macedo, A. A., Isernhagen, M., Pires, L., Oliveira, A., Paes-de-Almedia, V., Manfron, J., Carvalho, R. I., Carvalho, A., Brentan, D., Botelho, E. L., Dalsente, P. R., & Casparoto, A. (2019). Ethnopharmacological approaches to *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaerth. Exploring cardiorenal effects from the Brazilian Cerrado. *Journal of Ethnopharmacology*, 28(238), 111-117. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.111873>
- Loza-Cornejo, S., Aparicio-Fernández, X., Patafalvi, R. J. y Rosas-Saíto, G. H. (2017). Caracteres anatómicos y fitoquímicos del tallo y raíz de *Mammillaria uncinata* (Cactaceae). *Acta Botánica Mexicana*, 120, 21-30. <https://doi.org/10.21829/abm120.2017.1159>
- Lucena, A. (2020). Actividad biológica de *Tournefortia hirsutissima* sobre larvas de *Spodoptera frugiperda*. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Biológicas, Cuernavaca, Morelos 58 Pp. [En línea]. Disponible en: <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/3241/LUCAVZ09.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024.
- Luna-Rodríguez, A. K., Zenil-Zenil, M. A., Cristians, S., Osuna-Fernández, A. M., & Osuna-Fernández, H. R. (2022). Evaluation for the hypoglycemic effect of *Tectaria heracleifolia* (Willd.) under in mice with induced type 2 diabetes. *Polibotánica*, 54, 203-217. <https://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n54/1405-2768-polib-54-203.pdf>
- Lustre, H. (2022). Los superpoderes de las plantas: los metabolitos secundarios en su adaptación y defensa. *Revista Digital Universitaria*, 23(2), 1-8. <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.2.10>
- Luz, D. A., Pinheiro, A. M., Silva, M. L., Monteiro, M. C., Prediger, R. D., Ferraz-Maia, C. S., & Fontes-Júnior, E. A. (2016). Ethnobotany, phytochemistry and neuropharmacological effects of *Petiveria alliaea* L. (Phytolaccaceae): A review. *Journal of Ethnopharmacology*, 185, 182-201. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2016.02.053>
- Marie-Magdeleine, C., Udino, L., Philibert, L., Bocache, B., & Archimede, H. (2014). *In vitro* effects of *Musa x paradisiaca* extracts on four developmental stages of *Haemonchus contortus*. *Research in Veterinary Science*, 96(1), 127-132. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2013.12.004>
- Martin, D. A. (2017). Los compuestos fenólicos: un acercamiento a su biosíntesis, síntesis y actividad biológica. *RIAA*, 9(1), 81-103. <https://doi.org/10.22490/21456453.1968>
- Matrose, N. A., Obikeze, K., Belay, Z. A., & Caleb,

- O. J. (2021). Impact of spatial variation and extraction solvents on bioactive compounds, secondary metabolites and antifungal efficacy of South African Impepho [*Helichrysum odoratissimum* (L.) Sweet]. *Food Bioscience*, 42, 101139. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101139>
- Montoya, E. (2022). Actividad biológica de los grupos de metabolitos secundarios presentes en las pteridofitos *Goniopteris stolzeana* (AR Sm.) salino y TE *Alemida y Adiantum amplum* C Presi. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 172 Pp. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/368461548\\_Actividad\\_biologica\\_de\\_los\\_grupos\\_de\\_metabolitos\\_secundarios\\_presentes\\_en\\_los\\_pteridofitos\\_Goniopteris\\_stolzeana\\_y\\_Adiantum\\_amplum](https://www.researchgate.net/publication/368461548_Actividad_biologica_de_los_grupos_de_metabolitos_secundarios_presentes_en_los_pteridofitos_Goniopteris_stolzeana_y_Adiantum_amplum). Fecha de consulta: 23 de febrero de 2024.
- Morais-Braga, M. F. B., Souza, T. M., Santos, K. K. A., Guedes, G. M. M., Andrade, J. C., Vega, C., Rolón, M., Costa, J. G. M., Saraiva, A. F., & Coutinho, H. D. M. (2013). Phenol composition, cytotoxic and anti-kinetoplastidae activities of *Lygodium venustum* SW. (Lygodiaceae). *Experimental Parasitology*, 134(2), 178-182. <https://doi.org/10.1016/j.exppara.2013.03.014>
- Morales, Q. N. (2018). Estudio fitoquímico e identificación de compuestos antimicrobianos de dos plantas de la familia *Commelinaceae*. Tesis de Maestría en Ciencias en Biotecnología aplicada. IPN-CIBA Tlaxcala, México. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/27222/QUETZALI%20NICTE%20MORALES%20ORABANALES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Fecha de consulta: 23 de marzo de 2024.
- Morales-Ubaldo, Y., Rivero-Pérez, N., Morales-Ubaldo, A. L., Valladares-Carranza, B., López-Rodríguez, G. M. y Zaragoza-Bastida, A. (2022). Dalea bicolor: Una alternativa para el tratamiento de bacterias de importancia en salud pública. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 33(6), 1-6. <http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v33i6.22863>
- Morón, F., Victoria, M. C., Morejón, Z., López, M., García, A. I., Fuentes, V., Robineau, L. y Campo, C. (2008). Tamizaje fitoquímico, actividad analgésica y antiinflamatoria de decocción de *Costus pictus* D. Don. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 13(4), [En línea]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1028-47962008000400013&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962008000400013&lng=es&tlng=es). Fecha de consulta: 3 de enero de 2024.
- Navarro, L. G., Agosto, J. G., & Nolasco, H. (2023). Composición fitoquímica y propiedades antioxidantes de la planta mala madre (*Kalanchoe pinnata*). *South Florida Journal of Development*, 481, 201-214. <https://doi.org/10.46932/sfjdv4n1-014>
- Ndam, L. M., Ngone, A. M., Nkongho, R. N., Fongod, A. G., Tening, A. S., & Fujii, T. (2021). Allelopathic potentiality of *Euphorbia hypoeicifolia* L. on germination and seedling development of sympatric crops and weeds. *International Annals of Science*, 10(1), 134-150. <https://doi.org/10.21467/ias.10.1.134-150>
- Nirmala, C., Shahar, B., Dolma, N., Santosh, O. (2022). Promising underutilized wild plants of cold desert Ladakh, India for nutritional security and health benefits. *Applied Food Research*, 2(2), 100145. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100145>.
- Omokolo, N. D., Boudjeko, T., & Whitehead, C. S. (2005). Comparative analyses of alterations in carbohydrates, amino acids, phenols and lignin in roots of three cultivars of *Xanthosoma sagittifolium* infected by *Pythium myriotylum*. *South African Journal of Botany*, 71(3-4), 432-440. [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(15\)30596-2](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(15)30596-2)
- Ouakouak, H., Benchikha, N., Hassani, A., & Ashour, M. L. (2019). Chemical composition and biological activity of *Mentha citrata* Ehrh esencial oils growing in douthern Algeria. *Journal of Food Science and Technology*, 56(12), 346-535. <https://doi.org/10.1007%2Fs13197-019-04005-z>
- Osuna, A. M. (2015). Inexistentes las estrategias de cultivo para plantas y árboles medicinales, en *Boletín UNAM*. [En línea]. Disponible en: <https://www.comunicacionsocial.uam.mx/boletinesuam/124-15.html>. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2024.
- Pérez-Méndez, R., Jiménez-Quesada, K. y Garro-Monge, G. (2022). Cultivo *in vitro* de raíces pilosas del arbusto *Phyllanthus acuminatus* (Phyllanthaceae). *Revista de Biología Tropical*, 70(1), 647-657. <http://dx.doi.org/10.15517/rev.biol.trop.2022.49227>
- Picking, D., Delgoda, R., Boulogne, I., & Mitchell, S. (2013). *Hyptis verticillata* Jacq: A review of its traditional uses, phytochemistry, pharmacology and toxicology. *Journal of Ethnopharmacology*, 147(1), 16-41. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.01.039>
- Priya, S. & Serva, M. (2023). Physicochemical characterization, polyphenols and flavonoids of

- different extracts from leaves of four varieties of tulsi (*Ocimum sp.*). *South African Journal of Botany*, 159, 381-395. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.06.025>
- Quián, L., Chunhong, Z., Huiyong, F., & Leati, L. (2023). Indispensable biomolecules for plants defense against pathogens: NBS-LRR and “nitrogen pool” alkaloids. *Plant Science*, 334, 111752. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111752>
- Romo-Rico, J., Murali, S., Basaka, K., Golledge, J., & Jacob, M. (2022). Potential of plant secondary metabolite-based polymers to enhance wound healing. *Acta Biomaterialia*, 147, 34-49. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2022.05.043>
- Ruiz-Cancino, A., Cano, A. E., & Delgado, G. (1993). Sesquiterpene lactones and flavonoids from *Artemisia ludoviciana ssp. mexicana*. *Phytochemistry*, 33(5), 1113-1115. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(93\)85032-M](https://doi.org/10.1016/0031-9422(93)85032-M)
- Santos, P. C., Oliveria, f., Bronzel, J. L., Payarini, R., Pereira, G. M., Chorilli, M., Reis, C., Pereira, L., & Gonzalves, R. M. (2022). Insecticidal activity of *Tagetes erecta* and *Tagetes patula* extracts and fractions free and microencapsulated. *Biocatalysis in Agricultural Biotechnology*, 45, 102511. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102511>
- Senthil-Nathan, S., Park, S. U., & Day, B. (2022). Plant secondary metabolites as bioactive substance for the sustainable agriculture. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 121, 101890. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2022.101890>
- Silva, M., Terra, W. R., & Ferreira, C. (2006). Absorption of toxic  $\beta$ -glucosides produced by plants and their effect on tissue trehalases from insects. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 143(3), 0-373. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2005.12.011>
- Sivasamugham, L. A., Nimalan, V., & Subramaniam, G. (2021). Antibacterial effects of *Musa sp.* ethanolic leaf extracts against methicillin-resistant and susceptible *Staphylococcus aureus*. *Formerly Natural Product Letters*, 35, 107-110. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.09.007>
- Soubedi, B., Poudel, A., & Aryal, S. (2023). The impact of climate change on insect pest biology and ecology: Implications for pest management strategies, crop production, and food security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100733. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100733>
- Sun, Y. & Fernie, A. R. (2023). Plant secondary metabolism in a fluctuating world: climate change perspectives. *Trends in Plant Science*, 29(5), 560-571. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.11.008>
- Suselo, Y. H., Indarto, D., Wasita, B., & Hartono, H. (2023). Alkaloid fraction of *Mirabilis jalapa* Linn. Flowers has low cytotoxicity and increases iron absorption through Erythropoietin-Matriptase-2-Hepcidin pathway in iron deficiency hepatocarcinoma cell model. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(1), 103508. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103508>
- Tabarez, A. (2019). Evaluación de la actividad antioxidante de extractos y xantonas en un modelo químico y celular. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/27338>. Fecha de consulta: 21 de enero de 2024.
- Uysal, S., Gevrenova, R., Sinan, K. I., Bayarslan, A. U., Altunoglu, Y. C., Zheleva-Dimitrova, D., Ak, G., Baloglu, M., Etienne, O., Lobine, D., Mahomoodally, M., & Zengin, G. (2021). New perspectives into the chemical characterization of *Sida acuta* Burm. f. extracts with respect to its anti-cancer, antioxidant and enzyme inhibitory effects. *Process Biochemistry*, 105, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.03.028>
- Vanti, G. L., Kurjogi, M., Basavesha, K. N., Teraldal, N. L., Masaphy, S., & Nargund, V. B. (2019). Synthesis and antibacterial activity of solanum torvum mediated silver nanoparticle against *Xanthomonas axonopodis pv. punicae* and *Ralstonia solanacearum*. *Journal of Biotechnology*, 309, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2019.12.009>
- Vargas, M. (2014). Actividad microbiana de extractos de Chile (*Capsicum annum* L.) cultivado en invernadero empleando factores inductores de metabolitos (FIMs). Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Biosistemas. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Qro., 88 Pp. [En línea]. Disponible en: <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/792/1/RI003900.PDF>. Fecha de consulta: 17 de abril de 2024.
- Yadav, B., Jogawat, A., Rahman, S., & Narayan, O. M. (2021). Secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: A review. *Gene Reports*, 23, 101040. <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2021.101040>
- Zachariah, S. M., Aleykutty, N. A., Viswanad, V., Jacob, S., & Prabhakar, V. (2011). In-vitro Antioxidant Potential of Methanolic Extracts of *Mirabilis*

lis jalapa Linn. *Free Radicals and Antioxidants*, 1(4), 82-86. <https://doi.org/10.5530/ax.2011.4.13>

Zhang, C. P., Zhang, J. L., Sun, Z. R., Liu, X. Y., Shu, L. Z., Wu, H., Song, Y., & He, D. H. (2022). Genome-wide identification and characterization of terpen synthases genes in *Gossypium hirsutum*. *Gene*, 828(20), 146462. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2022.146462>

Zhao, P., Iwamoto, Y., Kouno, I., Egami, Y., & Yamamoto, H. (2004). Stimulating the production of homoisoflavonoids in cell suspension cultures of *Caesalpinia pulcherrima* using cork tissue. *Phytochemistry*, 65(17), 2455-2461. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.08.004>

Zárate-Martínez, W., González-Morales, S., Ramírez-Godina, F., Robledo-Olivo, A. y Juárez-Maldonado, A. (2021). Efecto de los ácidos fenólicos en el sistema antioxidante de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.). *Agronomía Mesoamericana*, 32(3), 854-868 <https://doi.org/10.15517/am.v32i3.45101>

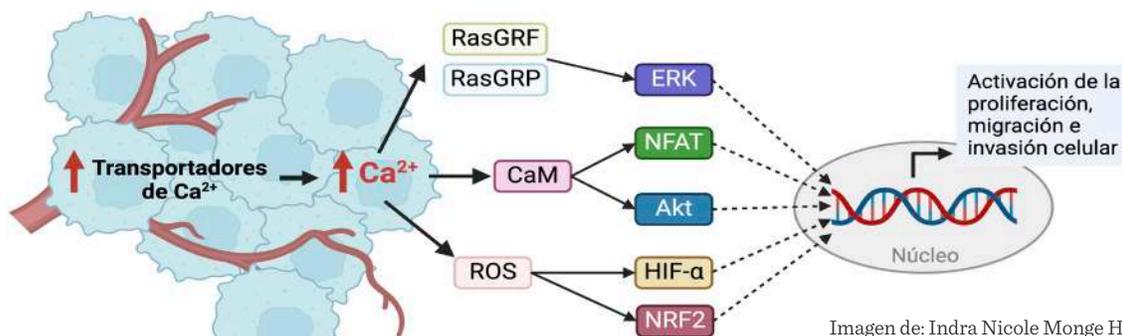


Imagen de: Indra Nicole Monge Hernández

# Transportadores de Ca<sup>2+</sup> y su papel en las características distintivas del cáncer

## Ca<sup>2+</sup> transporters and their role in the cancer hallmarks

Indra Nicole Monge-Hernández, Juan Santiago-García\*

### RESUMEN

El ion calcio (Ca<sup>2+</sup>) activa diversas vías de señalización importantes en diferentes procesos celulares como proliferación, progresión del ciclo celular, apoptosis y expresión génica. La homeostasis de Ca<sup>2+</sup> depende de diversas proteínas, que actúan como canales, bombas, receptores, sitios de unión y almacenamiento de Ca<sup>2+</sup>, las cuales son de gran importancia porque regulan el flujo, compartimentación y concentración del Ca<sup>2+</sup> celular, para que las vías de señalización dependientes de este catión funcionen adecuadamente. El objetivo del presente trabajo fue analizar la información existente sobre los cambios en la expresión de transportadores de Ca<sup>2+</sup> en cáncer y su participación en las características distintivas de la enfermedad, principalmente la proliferación celular descontrolada, la resistencia a la apoptosis o la activación de la migración e invasión celular. La evidencia indica que múltiples canales de Ca<sup>2+</sup> se sobreexpresan en cáncer, lo que se asocia con incremento del Ca<sup>2+</sup> citoplásmico y activación de las vías de señalización CaM/CaN/NFAT, Akt o MAPK/ERK, situación que puede conducir a un incremento en la proliferación, transición epitelio-mesenchimal, mayor capacidad de migración e invasión celular. Por otro lado, la subexpresión de bombas de Ca<sup>2+</sup> o sobreexpresión de canales mitocondriales contribuye a la evasión de la apoptosis, a la par que propicia la migración celular. El estudio de transportadores de Ca<sup>2+</sup> con expresión alterada en cáncer puede contribuir a la identificación de potenciales biomarcadores o blancos terapéuticos que permitan el desarrollo de nuevas terapias.

**PALABRAS CLAVE:** cáncer, transportadores de calcio, proliferación celular, apoptosis, migración e invasión celular.

### ABSTRACT

Calcium ion (Ca<sup>2+</sup>) activates crucial signaling pathways involved in different cellular processes, such as proliferation, cell cycle progression, apoptosis and gene expression. Ca<sup>2+</sup> signaling depends on various proteins, including channels, pumps, receptors, and binding or storage proteins, which regulate Ca<sup>2+</sup> influx, compartmentalization, and concentration for Ca<sup>2+</sup> dependent signaling pathways to function properly. This work aimed to analyze evidence regarding the altered expression of Ca<sup>2+</sup> transporters in cancer and their contribution to the hallmarks of the disease, mainly sustained cellular proliferation, apoptosis resistance, and activation of migration and invasion. Evidence suggests that overexpression of Ca<sup>2+</sup> channels in cancer is associated with increased Ca<sup>2+</sup> entry and activation of CaM/CaN/NFAT, Akt or MAPK/ERK signaling pathways, leading to cell proliferation, migration, invasion, and epithelial-mesenchymal transition. On the other hand, the downregulation of Ca<sup>2+</sup> pumps or upregulation of mitochondrial channels contributes to apoptosis evasion and enhanced cellular migration. Research on Ca<sup>2+</sup> transporters with deregulated expression in cancer may contribute to the identification of potential biomarkers and therapeutic targets for the development of new treatments.

**KEYWORDS:** cancer, calcium transporters, cell proliferation, apoptosis, cell migration and invasion.

\*Correspondencia: [jusantiago@uv.mx](mailto:jusantiago@uv.mx)/Fecha de recepción: 14 de mayo de 2024/Fecha de aceptación: 22 de agosto de 2024/Fecha de publicación: 9 de septiembre de 2024.

Universidad Veracruzana, Instituto de Investigaciones Biológicas, Laboratorio de Biología Molecular, avenida Luis Castelazo Ayala s/n, Industrial Ánimas, Xalapa, Veracruz, México, C. P. 91190.

## INTRODUCCIÓN

El ion calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) es un señalizador universal en las células eucariotas y participa en procesos celulares esenciales como proliferación, progresión del ciclo celular, apoptosis, expresión génica, contracción muscular, transmisión sináptica, entre otros (Berridge y col., 2003; Monteith y col., 2017). La transición a la vida pluricelular que ocurrió hace 2 000 millones de años, requirió un ion o molécula que actuara como segundo mensajero (los primeros mensajeros desarrollados fueron en general las hormonas) para que las células pudieran intercambiar señales entre sí y llevar a cabo funciones específicas dentro de un mismo organismo. El  $\text{Ca}^{2+}$  resultó un señalizador apto, ya que es capaz de interactuar con diversas proteínas y regular su actividad. Además, puede unirse a proteínas “amortiguadoras” que lo secuestran y mantienen su concentración citosólica ( $[\text{Ca}^{2+}]_c$ ) en niveles nanomolares, o a proteínas “efectoras y/o sensores” que activan distintas vías de señalización (Carafoli y Krebs, 2016).

En condiciones normales, la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$  es de 100 nM a 200 nM, mientras que su concentración extracelular es de 1 mM a 1.5 mM (Berridge y col., 2003; Clapham, 2007; Monteith y col., 2007; Roderick y Cook, 2008; Marchi y col., 2020). La entrada o liberación de  $\text{Ca}^{2+}$  en respuesta a señales intra o extracelulares puede ocasionar el incremento de la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$  basal (hasta 1  $\mu\text{M}$  a 2  $\mu\text{M}$ ), lo que activa diversas vías de señalización (Marchi y col., 2020). Una vez que el  $\text{Ca}^{2+}$  ha cumplido su función señalizadora, es necesario regresar a la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$  basal para que los procesos celulares no continúen activados de manera anormal (Roderick y Cook, 2008). Para mantener la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$  adecuada durante todo este proceso, se requiere la participación de distintas proteínas presentes en la membrana plasmática (MP), citosol, retículo endoplásmico (RE), mitocondria, aparato de Golgi (AG) y lisosomas, a las cuales se denominan en conjunto “maquinaria de la señalización de  $\text{Ca}^{2+}$ ” (Berridge y col., 2003; Clapham, 2007; Roderick y Cook, 2008) y que tienen funciones de:

**Canales:** atraviesan la MP y engloban a los

canales aniónicos dependientes de voltaje (VDAC, por sus siglas en inglés: Voltage-Dependent Anion Channels), que facilitan la entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  al citoplasma, gracias a cambios en el potencial de membrana; los canales receptores de potencial transitorio (TRP, por sus siglas en inglés: Transient Receptor Potential), que permiten la entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  al cambiar la polarización de membrana; los canales dependientes de depósito, que se activan por la depleción de  $\text{Ca}^{2+}$  en el RE, como ORAI (Modulador de calcio activado por la liberación de calcio); los canales receptores de inositol 1,4,5-trifosfato ( $\text{IP}_3$ ) ( $\text{IP}_3\text{R}$ ) y los canales receptores de rianodina (RYR), que permiten la liberación de  $\text{Ca}^{2+}$  desde el RE; los canales de dos poros (TPC, por sus siglas en inglés: Two Pore Channels), que facilitan la salida de  $\text{Ca}^{2+}$  desde los lisosomas, y el uniportador de  $\text{Ca}^{2+}$  mitocondrial (MCU), el cual se encuentra en la membrana interna de la mitocondria y facilita la entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  a este organelo.

**Receptores:** están presentes en la MP y comprenden a los receptores acoplados a proteínas G (GPCR, por sus siglas en inglés: G Protein-Coupled Receptors) y los receptores tirosina-cinasa (RTK, por sus siglas en inglés: Receptor Tyrosine Kinases). Su activación por diversos agonistas ocasiona la estimulación de fosfolipasas (fosfolipasa C  $\beta$  y  $\gamma$ ), las cuales escinden al fosfatidilinositol 4,5-bifosfato ( $\text{PIP}_2$ ) para formar al  $\text{IP}_3$ . El  $\text{IP}_3$  se une a los  $\text{IP}_3\text{R}$ , lo que provoca la liberación de  $\text{Ca}^{2+}$  del RE.

**Bombas e intercambiadores:** están presentes en la MP, RE, AG o mitocondria. Las bombas requieren de una molécula que les proporcione energía, en este caso el trifosfato de adenosina (ATP, por sus siglas en inglés: Adenosine Triphosphate) para transportar el  $\text{Ca}^{2+}$  al interior del organelo correspondiente o al espacio extracelular. Entre estas moléculas se encuentran las ATPasas de  $\text{Ca}^{2+}$  de MP (PMCA, por sus siglas en inglés: Plasma Membrane Calcium ATPase), las ATPasas de  $\text{Ca}^{2+}$  del RE (SERCA, por sus siglas en inglés: Sarco/Endoplasmic Reticulum Calcium ATPase) y las ATPasas de  $\text{Ca}^{2+}$  del AG (SPCA, por

sus siglas en inglés: Secretary Pathway Calcium ATPase). Por otro lado, los intercambiadores expulsan o introducen  $\text{Ca}^{2+}$  gracias a diferencias en el gradiente de concentración, entre ellos los intercambiadores de  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  (NCX) y  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+} - \text{K}^+$  (NCKX) de la MP, y el intercambiador de  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  de la mitocondria (NCLX).

**Moléculas efectoras/sensores:** proteínas de unión a  $\text{Ca}^{2+}$  que detectan cambios en la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$ , transducen dicha información y activan diversas vías de señalización, como la calmodulina (CaM), anexinas (ANXA), cinasas dependientes de CaM- $\text{Ca}^{2+}$  (CAMK), la molécula de interacción estromal (STIM), las proteínas S100, entre otras.

**Amortiguadores:** proteínas de unión a  $\text{Ca}^{2+}$  presentes en citoplasma y RE, que se encargan de mantener la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$  en niveles bajos (100 nM a 200 nM). Comprende a la parvalbúmina (PV), calretinina (CALB2), calsecuestri- na (CASQ), calreticulina (CALR), entre otras.

La alteración en la liberación y movilización del  $\text{Ca}^{2+}$ , que depende de los transportadores de este catión (canales, bombas e intercambiadores) (Figura 1), puede ocasionar efectos negativos en la célula y en los casos más extremos, contribuir al desarrollo de diversas patologías, entre ellas el cáncer (Hanan- han y Weinberg, 2011; Marchi y col., 2020).

El objetivo de este trabajo fue analizar los cambios en la expresión de transportadores de  $\text{Ca}^{2+}$  en cáncer y su contribución al mantenimiento de las características distintivas de esta enfermedad, principalmente la proliferación celular descontrolada, la resistencia a la apoptosis o la activación de la migración e invasión celular.

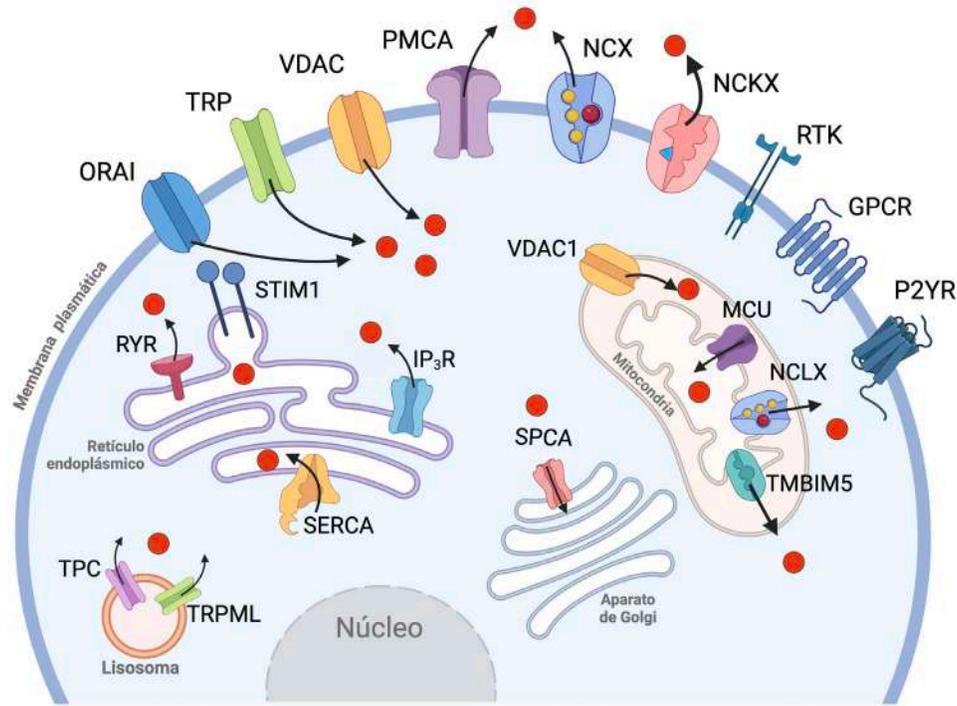
### **Procedimiento de búsqueda de la información**

Los artículos consultados se obtuvieron mediante la búsqueda en PubMed con los siguientes términos: “señalización de calcio” (calcium signaling), “remodelación de calcio en cáncer” (calcium remodeling in cancer), “características distintivas del cáncer” (cancer hall-

marks), “expresión diferencial de genes en cáncer” (differential gene expression in cancer) y la abreviatura de cada transportador (canal, bomba o intercambiador) seguido de “proliferación” (proliferation), “apoptosis”, “migración e invasión celular” (cellular migration and invasion) y “cáncer” (cancer) (por ejemplo, “TRPC6 AND proliferation AND cancer”). Se incluyeron tanto artículos originales como revisiones publicadas en los últimos 15 años y algunas referencias clásicas, dando mayor énfasis a aquellos trabajos publicados en los últimos 5 años. Se realizó un resumen de cada artículo tomando en cuenta los resultados más relevantes, y posteriormente se clasificaron de acuerdo con la característica distintiva del cáncer analizada (proliferación celular, apoptosis y/o migración e invasión celular) y la vía de señalización descrita.

### **Expresión desregulada de transportadores de $\text{Ca}^{2+}$ y su papel en la proliferación celular**

En cáncer, la expresión alterada de diversos transportadores de  $\text{Ca}^{2+}$  se ha asociado con la activación de la proliferación celular, aunque la mayor parte de la evidencia apunta a la participación de canales de  $\text{Ca}^{2+}$ . Específicamente, la sobreexpresión de estos canales se relaciona con incremento de la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$ , ya que facilitan la entrada de este catión desde el espacio extracelular o su liberación desde los reservorios intracelulares. Dicho aumento en la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$  activa diversas vías de señalización, como CaM/CaN/NFAT, MAPK/ERK (por sus siglas en inglés: Mitogen-Activated Protein Kinases/Extracellular-Signal-Regulated Kinase) o Akt. En el caso de la vía CaM/CaN/NFAT, el  $\text{Ca}^{2+}$  estimula a la CaM, que consecuentemente activa a la calcineurina (CaN), la cual desfosforila al factor nuclear de células T activadas (NFAT, por sus siglas en inglés: Nuclear Factor of Activated T-cells) y facilita su translocación hacia el núcleo. Este factor induce la transcripción de genes como MYC y RAS (Figura 2), que activan a la cinasa dependiente de ciclina E (CDK2), lo que propicia la progresión del ciclo celular, específicamente de la fase G1 a S, y por consiguiente la proliferación celular (Humeau y col., 2018).



■ **Figura 1. Canales, receptores, bombas e intercambiadores que participan en la regulación del  $\text{Ca}^{2+}$  celular.**

Figure 1. Channels, receptors, pumps and exchangers that participate in cellular  $\text{Ca}^{2+}$  regulation.

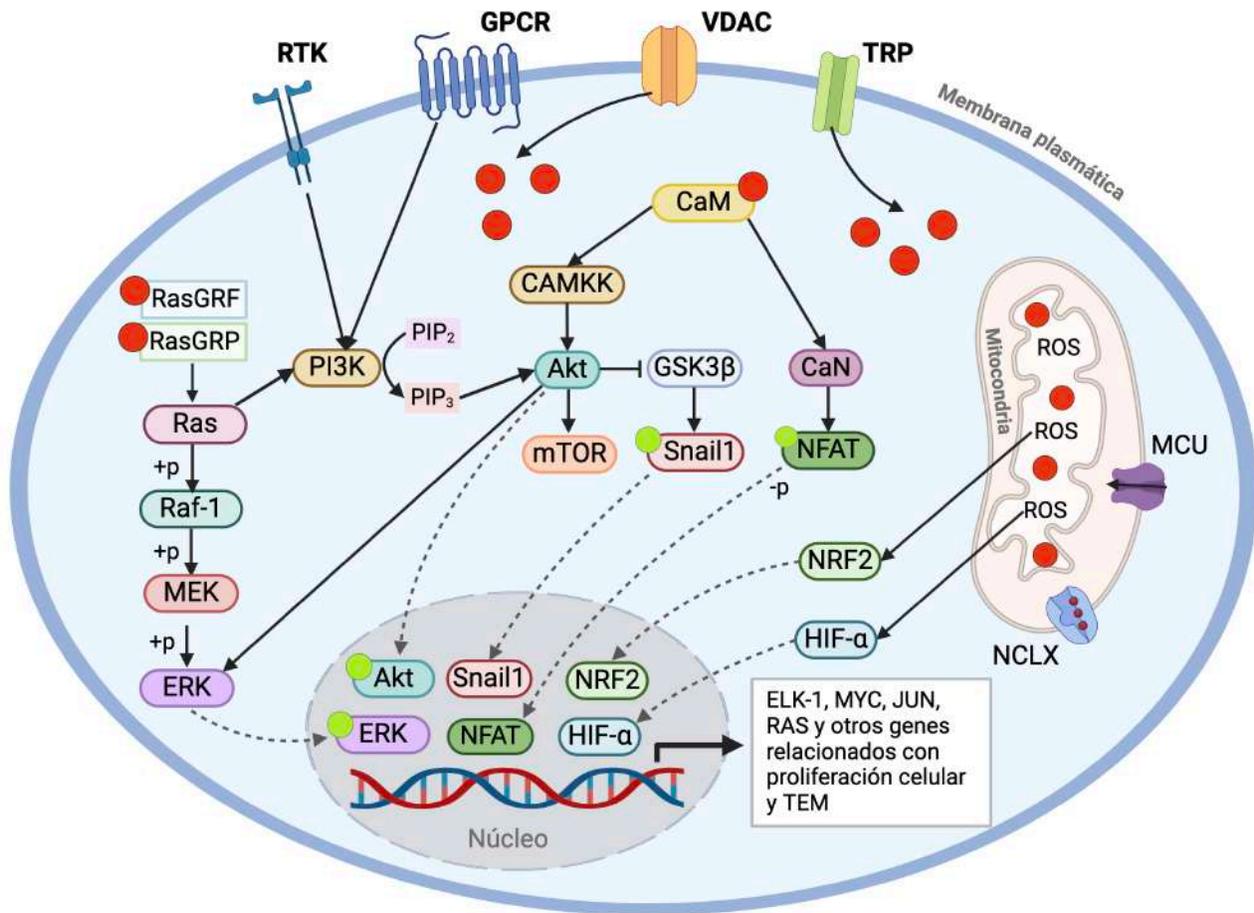
Canales: ORAI - Modulador de calcio activado por la liberación de calcio; TRP - canal receptor de potencial transitorio; VDAC - canal aniónico dependiente de voltaje; VDAC1 - canal aniónico mitocondrial dependiente de voltaje; MCU - uniportador de  $\text{Ca}^{2+}$  mitocondrial; TPC - canal de dos poros; TRPML - TRP mucolipina; RYR - receptor de rianodina;  $\text{IP}_3\text{R}$  - receptor de  $\text{IP}_3$ . Receptores: RTK - receptor tirosina cinasa; GPCR - receptor acoplado a proteínas G; P2YR - receptor purinérgico P2. Bombas: PMCA - ATPasa de  $\text{Ca}^{2+}$  de la membrana plasmática; SERCA - ATPasa de  $\text{Ca}^{2+}$  de RE; SPCA - ATPasa de  $\text{Ca}^{2+}$  de la vía secretora. Intercambiadores: NCX - intercambiador de  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ ; NCKX - intercambiador de  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}-\text{K}^+$ ; NCLX - intercambiador de  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  mitocondrial; TMBIM5 - intercambiador de  $\text{H}^+/\text{Ca}^{2+}$  mitocondrial; Moléculas efectoras/sensores: STIM1 - proteína de interacción estromal 1. Los círculos rojos representan al  $\text{Ca}^{2+}$ , los círculos amarillos representan al  $\text{Na}^+$  y el triángulo azul al  $\text{K}^+$ .

Fuente: Modificado a partir de Lai y col. (2022) y creado con Biorender.com.

En este contexto, la sobreexpresión de los canales receptores de potencial transitorio (TRP, por sus siglas en inglés: Transient Receptor Potential Cation Channel) TRPV4 en cáncer nasofaríngeo, TRPM8 en cáncer esofágico, TRPC3 en cáncer gástrico, ORAI1 en cáncer orofaríngeo y ORAI3 en cáncer de próstata, se relaciona con aumento en la entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  al citoplasma, lo que ocasiona la activación de CaN, translocación de diferentes isoformas de NFAT al núcleo y estimulación de la proliferación celular (Dubois y col., 2014; Lee y col., 2016; Lan y col., 2019; Lin y col., 2021a;

Zhang y col., 2022a). Asimismo, la sobreexpresión de los canales TRPV6 y TRPC6 se vincula con activación de la transcripción de NFAT en cáncer de próstata y cáncer ovárico (Thebault y col., 2006; Lehen'kyi y col., 2007; Bouchard y col., 2024).

La sobreexpresión de canales de  $\text{Ca}^{2+}$ , también se ha asociado con la activación de la vía MAPK/ERK en cáncer. Esta vía se regula por múltiples cinasas, donde el  $\text{Ca}^{2+}$  inicialmente activa a los factores intercambiadores de nucleótidos de guanina (RasGRF o



■ Figura 2. Vías de señalización de Ca<sup>2+</sup> relevantes en proliferación celular y transición epitelio-mesenchimal (TEM).

Figure 2. Ca<sup>2+</sup> signaling pathways relevant to cellular proliferation and epithelial-mesenchymal transition (EMT).

La entrada de Ca<sup>2+</sup> al citoplasma puede ocasionar la activación de las vías CaM/CaN/NFAT, Akt y/o MAPK/ERK, lo que propicia la transcripción de genes relacionados con proliferación celular y TEM. La entrada de Ca<sup>2+</sup> a la mitocondria ocasiona la acumulación de ROS, lo que propicia la transcripción de genes relacionados con la TEM. Las flechas punteadas representan la translocación al núcleo; los círculos rojos al Ca<sup>2+</sup>; los círculos verdes a la fosforilación de las proteínas indicadas; MCU - uniportador de Ca<sup>2+</sup> mitocondrial; NCLX - intercambiador de Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> mitocondrial; +p a la fosforilación dependiente de ATP, mediada por las proteínas indicadas; y -p representa a la desfosforilación mediada por las proteínas indicadas. RasGRF o RasGRP - factores intercambiadores de nucleótidos de guanina; Ras - GTPasa sarcoma de rata; Raf-1 - proteína cinasa de MEK; MEK - proteína cinasa de ERK; ERK - proteína cinasa regulada por señales extracelulares; PI3K - fosfoinositol 3-cinasa; PIP<sub>2</sub> - fosfatidilinositol-4,5-bifosfato; PIP<sub>3</sub> - fosfatidilinositol-3,4,5-trifosfato; CaM - calmodulina; CAMKK - cinasa de la proteína cinasa dependiente de Ca<sup>2+</sup>-CaM; Akt - proteína cinasa serina-treonina; mTOR - proteína diana de rapamicina en células de mamífero; GSK3β - glucógeno sintasa cinasa-3β; CaN - calcineurina; NFAT - factor nuclear de células T activadas; NRF2 - factor 2 relacionado con el factor nuclear eritroide 2; HIF-α - factor 1α inducible por hipoxia; Snail1 - represor transcripcional 1; ROS - especies reactivas de oxígeno; VDAC - canal aniónico dependiente de voltaje; TRP - canal receptor de potencial transitorio; RTK - receptor tirosina-cinasa; GPCR - receptor acoplado a proteínas G. Fuente: Creado con Biorender.com.

RasGRP), quienes posteriormente estimulan a las proteínas Ras y Raf-1 y desencadenan una cascada de señalización que culmina con la fosforilación y activación de la cinasa ERK. ERK-fosforilada (p-ERK) se transloca al núcleo y regula la transcripción de genes asociados con la progresión del ciclo celular, como ELK-1, MYC y JUN (Figura 2) (Bahar y col., 2023). En este sentido, la sobreexpresión de los canales TRPA1 en cáncer de pulmón y ORAI3 en cáncer de mama provoca el incremento de  $[Ca^{2+}]_c$  y activación de ERK, lo que se relaciona con mayor proliferación y menor viabilidad celular (Faouzi y col., 2011; Schaefer y col., 2013). Asimismo, la sobreexpresión de TRPM2 en cáncer de páncreas se vincula con estimulación de la proliferación, probablemente porque el incremento en la entrada de  $Ca^{2+}$  ocasiona la activación de la proteína cinasa  $C\alpha$  (PKC $\alpha$ ), la cual fosforila a Raf-1 y consecuentemente activa a ERK (Lin y col., 2021b). Por otro lado, el silenciamiento del canal lisosomal TRPML1 se asocia con disminución de p-ERK, pero únicamente en tumores con mutaciones en el gen HRAS (Jung y col., 2019), mientras que el silenciamiento de la bomba de  $Ca^{2+}$  SPCA2 disminuye los niveles de p-ERK en células de cáncer de mama, lo que a su vez correlaciona con disminución en la translocación de NFAT al núcleo (Feng y col., 2010).

La expresión elevada de canales de  $Ca^{2+}$  también se ha relacionado con la activación de la vía Akt en la condición tumoral. Esta vía depende de la estimulación de receptores tirosina-cinasa (RTK) o receptores acoplados a proteínas G (GPCR), que posteriormente activan a la fosfoinositol 3-cinasa (PI3K), que convierte el PIP<sub>2</sub> (fosfatidilinositol-4,5-bisfosfato) a PIP<sub>3</sub> (fosfatidilinositol-3,4,5-trifosfato). Subsecuentemente, el PIP<sub>3</sub> activa a Akt y dicha proteína estimula a mTOR, que participa en la síntesis de diversas proteínas (Revathidevi y Munirajan, 2019). Además, Akt puede activar a ERK u otros factores de transcripción que propician la expresión de genes relacionados con la proliferación celular, como CREB o NF- $\kappa$ B. El aumento en  $[Ca^{2+}]_c$  tam-

bién puede desencadenar esta vía mediante la estimulación de CAMKK (cinasa de la proteína cinasa dependiente de  $Ca^{2+}$ -CaM), que fosforila a Akt (Figura 2) (Revathidevi y Munirajan, 2019). En este contexto, la sobreexpresión de los canales RyR1 en carcinoma de útero, ORAI1 y ORAI2 en cáncer oral, y el intercambiador NCX1 en cáncer gástrico, se ha relacionado con mayor capacidad proliferativa, ya que ocasionan incremento en la  $[Ca^{2+}]_c$  y activación de Akt (Singh y col., 2020; Wan y col., 2022; Zhang y col., 2022b). Asimismo, se ha demostrado que la sobreexpresión de TRPC3 en cáncer gástrico ocasiona incremento de p-Akt, inactivación de GSK3 $\beta$  y translocación de NFATc2 al núcleo (Lin y col., 2021a). En contraste, la expresión ectópica del canal TRPC1 en líneas celulares de cáncer de mama se ha asociado con la disminución de PI3K, p-AKT y mTOR, y por lo tanto, con menor capacidad proliferativa (Zhang y col., 2020).

Además, el canal lisosomal TRPML2 se sobreexpresa en glioblastoma y su silenciamiento se asocia con la disminución de p-ERK y p-Akt, mientras que el silenciamiento de ORAI3 se relaciona con la disminución de p-Akt en cáncer de pulmón (Ay y col., 2013; Morelli y col., 2016). Por su parte, la sobreexpresión del canal ORAI1 en este tipo de cáncer se asocia con incremento en la entrada de  $Ca^{2+}$ , activación de Akt y ERK, y mayor proliferación celular (Jones y Hazlehurst, 2021). Sin embargo, aún se desconocen los genes relacionados con dicha característica distintiva que se activan mediante estas vías, o las proteínas activadas o desactivadas por p-ERK o p-Akt en esos casos.

Aunado a lo anterior, se ha demostrado que el  $Ca^{2+}$  propicia la proliferación celular mediante otras vías celulares. Por ejemplo, la sobreexpresión de TRPM2 en carcinoma hepatocelular (CHC) se vincula con la entrada de  $Ca^{2+}$  al citoplasma, activación de CaM y consecuente estimulación de la cinasa dependiente de calmodulina (CaMKII), que activa a las cinasas dependientes de ciclinas CDK2 y

CDK4, las cuales ocasionan la progresión de la fase G1 a S (Cai y col., 2023). Por otro lado, la sobreexpresión del canal TRPV6, en cáncer de próstata, se relaciona con mayor entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  al citoplasma y consecuente aumento en la expresión de ciclina D1, CDK4 y el antígeno de proliferación nuclear (PCNA), lo que se asocia con activación de la proliferación (Bouchard y col., 2024). Adicionalmente, la sobreexpresión de ORAI1 en cáncer cervical propicia la expresión de interleucina 6 y proliferación celular (Pan y col., 2022), mientras que la sobreexpresión de MCU en cáncer colorrectal eleva la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  mitocondrial ( $[\text{Ca}^{2+}]_m$ ), lo que se relaciona con formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y activación de NF- $\kappa$ B (Liu y col., 2020).

Por otra parte, existen diversos transportadores de  $\text{Ca}^{2+}$  cuya expresión desregulada en cáncer correlaciona con la proliferación celular, pero se desconocen las vías celulares involucradas. En algunos casos únicamente se ha comprobado que su silenciamiento (por “*knock-down*”) o inhibición farmacológica, reduce la capacidad proliferativa, como TRPC6 en cáncer de mama (Diez-Bello y col., 2019; Jardin y col., 2021); TRPM8 en cáncer de próstata (Di-Donato y col., 2021); TPC2 y ORAI/STIM1 en CHC, cáncer de pulmón y glioblastoma (Ge y col., 2019; Karacicek y col., 2019; Tajada y Villalobos, 2020; Müller y col., 2021); ORAI2 en cáncer de mama (Sanchez-Collado y col., 2022) y  $\text{CaV}_{3.1}$  en cáncer oral (Li y col., 2021).

### Expresión desregulada de transportadores de $\text{Ca}^{2+}$ y su papel en la apoptosis

En condiciones normales, cuando la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$  es mayor a  $\sim 400$  nM este se transporta hacia la mitocondria, a través de sitios de la membrana externa mitocondrial que interactúan con zonas de la membrana del RE ricas en receptores de  $\text{IP}_3$ . En dichas zonas existen canales mitocondriales que regulan la entrada de  $\text{Ca}^{2+}$ , como VDAC1 en la membrana externa y MCU en la membrana interna, el cual cuenta con múltiples subunida-

des reguladoras (MICU1/2/3, MCUR1, MCUb y EMRE). El aumento de la  $[\text{Ca}^{2+}]_m$  por arriba de  $\sim 100$   $\mu\text{M}$  de manera prolongada desata la vía intrínseca de muerte celular programada, provocada por la apertura del poro de transición de permeabilidad mitocondrial (PTPm), consecuente liberación del citocromo C (Cyt-C) al citoplasma y activación de caspasas proapoptóticas 3, 6, 7 y 9 (Moon, 2023). Una característica de las células tumorales es la resistencia a la apoptosis gracias a la remodelación en la expresión de los principales reguladores de la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  citoplásmica y mitocondrial. Por ejemplo, los canales TRPV4 y TRPML1 se subexpresan en cáncer de pulmón y glioblastoma, respectivamente, y su sobreexpresión ectópica o activación farmacológica induce la apoptosis, probablemente porque propician la entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  a citoplasma y subsecuente sobrecarga de  $\text{Ca}^{2+}$  mitocondrial (Morelli y col., 2019; Zhao y col., 2021). Asimismo, la activación farmacológica del canal TRPML1 en células de CHC y TRPV1 en cáncer de tiroides ocasiona la sobrecarga de  $\text{Ca}^{2+}$  mitocondrial y consecuente apertura de PTPm (Xu y col., 2020; Siow y col., 2022). Con base en lo anterior, se ha propuesto a la activación farmacológica de canales de  $\text{Ca}^{2+}$  en la condición tumoral como una alternativa terapéutica para desatar la apoptosis; sin embargo, esto también podría ocasionar la activación de transportadores relacionados con proliferación, migración e invasión celular.

En contraste, la bomba PMCA4 se sobreexpresa en cáncer de páncreas y se encarga de expulsar  $\text{Ca}^{2+}$  del citoplasma al espacio extracelular, por lo que evita el aumento sostenido de la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$  y se asocia con la evasión de la apoptosis provocada por sobrecarga de  $\text{Ca}^{2+}$  mitocondrial (Sritangos y col., 2020). No obstante, la evidencia sugiere que el incremento sostenido de  $\text{Ca}^{2+}$  en la mitocondria no siempre ocasiona la muerte celular en las células transformadas, también puede propiciar la migración e invasión, como se describe a continuación (Miao y col., 2021; Wang y col., 2022).

## Expresión desregulada de transportadores de $\text{Ca}^{2+}$ y su papel en la migración e invasión celular

Las células cancerígenas poseen la capacidad de migrar desde su lugar de origen hacia otros tejidos u órganos, lo que se conoce como metástasis (Hanahan y Weinberg, 2011; Jones y Hazlehurst, 2021). Uno de los mecanismos más estudiados que se asocia con esta característica es la transición epitelio-mesenquimal (TEM), que engloba a procesos como la separación de las células de la membrana basal, degradación de la matriz extracelular y pérdida de las uniones célula-célula. La E-cadherina es la principal proteína marcadora del fenotipo epitelial (no invasor), mientras que la N-cadherina, vimentina, metaloproteinasas de la matriz extracelular (MMP) y factores de transcripción como Snail1 y ZEB1/2 se asocian con el fenotipo mesenquimal (invasor) (Jones y Hazlehurst, 2021).

El incremento de  $\text{Ca}^{2+}$  en citoplasma, ocasionado por la expresión alterada de transportadores de  $\text{Ca}^{2+}$ , se suele relacionar con la presencia de marcadores mesenquimales en cáncer, por consiguiente, con la migración e invasión celular. Por ejemplo, la sobreexpresión de los canales TRPM8 en cáncer de vejiga y mama, TRPV2 en cáncer de próstata y TRPM7 en múltiples tipos de cáncer se asocia con mayor presencia de marcadores mesenquimales (vimentina, N-cadherina, Snail1, MMP2, MMP9) y menor expresión de marcadores epiteliales (E-cadherina), a la par que su silenciamiento ocasiona la reducción de la capacidad de migración e invasión celular (Monet y col., 2010; Liu y col., 2014; Wang y col., 2020a; Chen y col., 2022). Específicamente, la sobreexpresión de TRPM8 en cáncer de mama se relaciona con incremento del  $\text{Ca}^{2+}$  citoplásmico y consecuente fosforilación de Akt, inactivación de GSK3 $\beta$  y traslocación de Snail1 al núcleo, lo que propicia la transcripción de los genes relacionados con la TEM (Figura 2) (Liu y col., 2014).

Adicionalmente, se ha demostrado que la sobreexpresión de STIM1/ORAI1 ocasiona in-

cremento en la migración e invasión celular en cáncer gástrico, cáncer de mama y glioblastoma (Yang y col., 2009; Motiani y col., 2013; Xia y col., 2016). En cáncer gástrico, su sobreexpresión se relaciona con mayor expresión de vimentina, mientras que su silenciamiento *in vivo* reduce el tamaño tumoral y la metástasis hacia los pulmones (Xia y col., 2016). En contraste, la subexpresión de PMCA4 en este tipo de cáncer provoca la acumulación de  $\text{Ca}^{2+}$  en citoplasma y consecuente translocación de NFATc1 al núcleo, lo que se asocia con la activación transcripcional de ZEB1 y aumento de vimentina (Wang y col., 2020b). Otros estudios se han enfocado únicamente en el papel de STIM1 en la migración celular, pero no existe una tendencia clara acerca de su función en este proceso. Por ejemplo, su sobreexpresión en cáncer de tiroides, cáncer de próstata y cáncer de pulmón correlaciona con mayor expresión de marcadores mesenquimales y capacidad de migración (Wang y col., 2017; Zhou y col., 2017; Asghar y col., 2021). Adicionalmente, su sobreexpresión parece estar involucrada en la formación de estructuras celulares relacionadas con la invasión, como invadopodia o podosomas (Sun y col., 2014; Chen y col., 2017). En cambio, la subexpresión de STIM1 se asocia con mayor capacidad de migración en CHC, ya que reduce la entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  a citoplasma y ocasiona la transición de un metabolismo anabólico hacia uno catabólico, necesario para mantener el fenotipo invasor (Zhao y col., 2020).

Múltiples estudios relacionan la sobreexpresión del canal MCU con incremento de  $[\text{Ca}^{2+}]_m$  y mayor capacidad de migración e invasión. Por ejemplo, la sobreexpresión de MCU en cáncer esofágico y gástrico se asocia con mayor presencia de marcadores mesenquimales (vimentina, N-cadherina, MMP2, HIF-1 $\alpha$ , TGF- $\beta$ ) y menor expresión de marcadores epiteliales (E-cadherina) (Wang y col., 2020c; Miao y col., 2021). Asimismo, la sobreexpresión de dicho canal y su subunidad reguladora MCUR1 en CHC y cáncer de mama se ha relacionado con mayor migración e invasión celular (Ren

y col., 2017; Jin y col., 2019; Gao y col., 2021). Específicamente, el incremento en la entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  a la mitocondria inhibe a la enzima superóxido dismutasa 2, que se encarga de eliminar a las ROS. La acumulación de ROS correlaciona con la translocación del factor NRF2 hacia al núcleo (Figura 2), donde induce la transcripción de Notch1, lo que propicia la acumulación de marcadores mesenquimales como Snail1 y MMP2 (Jin y col., 2019). Igualmente, se ha demostrado la expresión elevada de MCU en cáncer de páncreas, donde ocasiona la sobreexpresión de NRF2 e incremento de la migración e invasión, aunque se desconoce si Notch1 está involucrado en esa respuesta (Wang y col., 2022). Lo anterior refleja la capacidad de las células tumorales para evadir la apoptosis que normalmente ocurre por la sobrecarga de  $\text{Ca}^{2+}$  mitocondrial.

En cáncer colorrectal, la subexpresión del intercambiador mitocondrial NCLX también se ha asociado con el incremento de  $[\text{Ca}^{2+}]_m$  y consecuente acumulación de ROS y activación de HIF-1 $\alpha$ , que induce la expresión de la hexocinasa 2 (HK2), aldolasa A y lactato deshidrogenasa, lo que se relaciona con un aumento en el consumo de glucosa y producción de lactato (Pathak y col., 2020). Esto evidencia que en las células transformadas ocurre un aumento en la glucólisis, ya que requieren de un mayor consumo de energía para mantener el fenotipo invasor. La alta demanda de glucosa por parte de las células tumorales también se ha observado en cáncer uterino, aunque en este caso, la sobreexpresión del canal RyR1 induce la liberación de  $\text{Ca}^{2+}$  a citoplasma y consecuente activación de Akt, que propicia la sobreexpresión de HK2 (Zhang y col., 2022b).

Interesantemente, algunos trabajos sugieren la implicación de las vías MAPK/ERK y Akt en la migración e invasión de las células tumorales. Por ejemplo, la sobreexpresión del canal TRPM7 en cáncer ovárico, ORAI3 en cáncer de pulmón y TRPM2 en cáncer gástrico se relaciona con el aumento de la  $[\text{Ca}^{2+}]_c$ ,

activación de Akt y presencia de marcadores mesenquimales (N-cadherina, vimentina, MMP1/2/3, Snail1) (Wang y col., 2014; Almasi y col., 2019; Liu y col., 2019; Daya y col., 2021). Por otro lado, se ha demostrado que la entrada de  $\text{Ca}^{2+}$ , ocasionada por la sobreexpresión de STIM1/ORAI1 en melanoma, propicia la activación de CaMKII, estimulación de Raf-1 y fosforilación de ERK, lo que se asocia con mayor capacidad de migración (Umemura y col., 2014).

Adicionalmente, la expresión desregulada de otros canales de  $\text{Ca}^{2+}$ , en cáncer, se ha asociado con la activación de la migración e invasión celular, pero se desconocen las vías celulares involucradas en esta respuesta. Tal es el caso de la sobreexpresión de ORAI1 y ORAI2 en cáncer oral (Singh y col., 2020), TPC2 en CHC y cáncer de vejiga (Müller y col., 2021), y la subexpresión de TPC2 en melanoma (D'Amore y col., 2020).

## CONCLUSIONES

En la manifestación de tumores cancerosos se sobreexpresan diferentes transportadores de  $\text{Ca}^{2+}$ , particularmente y de forma desregulada, lo hacen los canales de  $\text{Ca}^{2+}$ . Esta condición ocasiona el aumento sostenido de  $[\text{Ca}^{2+}]$  citoplásmico, lo cual se ha asociado con la activación aberrante de distintas vías de señalización, como  $\text{Ca}^{2+}$ -CaM/CaN/NFAT MAPK/ERK o Akt, situación que puede propiciar proliferación celular descontrolada, transición epitelio-mesenquimal, o migración e invasión celular, denominadas características distintivas del cáncer. Es importante realizar estudios que conduzcan al desarrollo de inhibidores farmacológicos con aplicación terapéutica en cáncer. La evidencia también sugiere que las células tumorales son capaces de evadir la apoptosis ocasionada por la sobrecarga de  $\text{Ca}^{2+}$  mitocondrial, pero pocos estudios se han enfocado a estudiar este fenómeno. Adicionalmente, la  $[\text{Ca}^{2+}]_m$  por arriba de los niveles normales propicia la migración e invasión celular. En pocos casos es posible delimitar si la desregulación de la expresión de transportadores de  $\text{Ca}^{2+}$  es causa o consecuencia de la

enfermedad; sin embargo, la identificación de este tipo de genes/proteínas, con expresión alterada, resulta de gran utilidad para la comprensión de los mecanismos moleculares y celulares involucrados en el progreso y mantenimiento del cáncer, además de contribuir a identificar potenciales biomarcadores que faciliten el diagnóstico, pronóstico o predic-

ción de la respuesta al tratamiento, así como blancos terapéuticos que permitan el desarrollo de terapias específicas y eficaces.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

## REFERENCIAS

- Almasi, S., Sterea, A. M., Wasundara, F., Clements, D. R., Marcato, P., Hoskin, D. W., Gujar, S., & El-Hiani, Y. (2019). TRPM2 ion channel promotes gastric cancer migration, invasion and tumor growth through the AKT signaling pathway. *Scientific Reports*, 9(1), 4182. <https://doi.org/10.1038/S41598-019-40330-1>
- Asghar, M. Y., Lassila, T., Paatero, I., Nguyen, V. D., Kronqvist, P., Zhang, J., Slita, A., Löf, C., Zhou, Y., Rosenholm, J., & Törnquist, K. (2021). Stromal interaction molecule 1 (STIM1) knock down attenuates invasion and proliferation and enhances the expression of thyroid-specific proteins in human follicular thyroid cancer cells. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 78(15), 5827-5846. <https://doi.org/10.1007/S00018-021-03880-0>
- Ay, A. S., Benzerdjeb, N., Sevestre, H., Ahidouch, A., & Ouadid-Ahidouch, H. (2013). Orai3 constitutes a native store-operated calcium entry that regulates non small cell lung adenocarcinoma cell proliferation. *PLoS One*, 8(9), 72889. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0072889>
- Bahar, M. E., Kim, H. J., & Kim, D. R. (2023). Targeting the RAS/RAF/MAPK pathway for cancer therapy: from mechanism to clinical studies. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 8(1), 455. <https://doi.org/10.1038/S41392-023-01705-Z>
- Berridge, M. J., Bootman, M. D., & Roderick, H. L. (2003). Calcium signalling: dynamics, homeostasis and remodelling. *Nature Reviews. Molecular Cell Biology*, 4(7), 517-529. <https://doi.org/10.1038/nrm1155>
- Bouchard, M. J., Wang, Y., Deng, X., Zhang, R., Lyu, H., Xiao, S., Guo, D., Ali, D. W., Michalak, M., Zhou, C., Chen, X. Z., & Tang, J. (2024). The TRPV6 calcium channel and its relationship with cancer. *Biology (Basel)*, 13(3), 168. <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY13030168>
- Cai, X., Yu, X., Yang, J., Lu, L., Hua, N., Duan, X., Ye, P., Ni, L., Jiang, L., Yang, W., Liang, T., & Yu, P. (2023). TRPM2 regulates cell cycle through the Ca<sup>2+</sup>-CaM-CaMKII signaling pathway to promote HCC. *Hepatology Communications*, 7(5), 1-15. <https://doi.org/10.1097/HC9.0000000000000101>
- Carafoli, E. & Krebs, J. (2016). Why calcium? How calcium became the best communicator. *Journal of Biological Chemistry*, 291(40), 20849-20857. <https://doi.org/10.1074/jbc.R116.735894>
- Chen, T. M., Huang, C. M., Hsieh, M. S., Lin, C. S., Lee, W. H., Yeh, C. T., & Liu, S. C. (2022). TRPM7 via calcineurin/NFAT pathway mediates metastasis and chemotherapeutic resistance in head and neck squamous cell carcinoma. *Aging (Albany NY)*, 14(12), 5250-5270. <https://doi.org/10.18632/AGING.204154>
- Chen, Y. W., Chen, Y. F., Chiu, W. T., Chen, H. C., & Shen, M. R. (2017). STIM1-dependent Ca<sup>2+</sup> signaling regulates podosome formation to facilitate cancer cell invasion. *Scientific Reports*, 7(1), 11523. <https://doi.org/10.1038/S41598-017-11273-2>
- Clapham, D. E. (2007). Calcium signaling. *Cell*, 131(6), 1047-1058. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.11.028>
- D'Amore, A., Hanbashi, A. A., Di-Agostino, S., Palombi, F., Sacconi, A., Voruganti, A., Taggi, M., Canipari, R., Blandino, G., Parrington, J., & Filippini, A. (2020). Loss of two-pore channel 2 (TPC2) expression increases the metastatic traits of melanoma cells by a mechanism involving the hippo signalling pathway and store-operated calcium entry. *Cancers*, 12(9), 2391. <https://doi.org/10.3390/cancers12092391>
- Daya, H. A., Kouba, S., Ouled-Haddou, H., Benzerdjeb, N., Telliez, M. S., Dayen, C., Sevestre, H., Garçon, L., Hague, F., & Ouadid-Ahidouch, H. (2021). Orai3-mediates cisplatin-resistance in non-

small cell lung cancer cells by enriching cancer stem cell population through PI3K/AKT pathway. *Cancers*, 13(10), 2314. <https://doi.org/10.3390/CANCERS13102314>

Di-Donato, M., Ostacolo, C., Giovannelli, P., Di Sarno, V., Monterrey, I. M. G., Campiglia, P., Migliaccio, A., Bertamino, A., & Castoria, G. (2021). Therapeutic potential of TRPM8 antagonists in prostate cancer. *Scientific Reports*, 11(1), 23232. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02675-4>

Diez-Bello, R., Jardin, I., Lopez, J. J., El-Haouari, M., Ortega-Vidal, J., Altarejos, J., Salido, G. M., Salido, S., & Rosado, J. A. (2019). (-)-Oleocanthal inhibits proliferation and migration by modulating Ca<sup>2+</sup> entry through TRPC6 in breast cancer cells. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Cell Research*, 1866(3), 474-485. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2018.10.010>

Dubois, C., Vanden-Abeele, F., Lehen'kyi, V., Gkika, D., Guarmit, B., Lepage, G., Slomianny, C., Borowiec, A. S., Bidaux, G., Benahmed, M., Shuba, Y., & Prevarskaya, N. (2014). Remodeling of channel-forming ORAI proteins determines an oncogenic switch in prostate cancer. *Cancer Cell*, 26(1), 19-32. <https://doi.org/10.1016/J.CCR.2014.04.025>

Faouzi, M., Hague, F., Potier, M., Ahidouch, A., Sevestre, H., & Ouadid-Ahidouch, H. (2011). Down-regulation of Orai3 arrests cell-cycle progression and induces apoptosis in breast cancer cells but not in normal breast epithelial cells. *Journal of Cellular Physiology*, 226(2), 542-551. <https://doi.org/10.1002/jcp.22363>

Feng, M., Grice, D. M., Faddy, H. M., Nguyen, N., Leitch, S., Wang, Y., Muend, S., Kenny, P. A., Sukumar, S., Roberts-Thomson, S. J., Monteith, G. R., & Rao, R. (2010). Store-independent activation of Orai1 by SPCA2 in mammary tumors. *Cell*, 143(1), 84-98. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2010.08.040>

Gao, P., Peng, T., Lin, S., Zhi, W., Cao, C., Wu, P., Xi, L., Wu, P., Yang, Q., & Ding, W. (2021). Key role of MCUR1 in malignant progression of breast cancer. *Onco Targets and Therapy*, 14, 4163-4175. <https://doi.org/10.2147/OTT.S306854>

Ge, C., Zeng, B., Li, R., Li, Z., Fu, Q., Wang, W., Wang, Z., Dong, S., Lai, Z., Wang, Y., Xue, Y., Guo, J., Di, T., & Song, X. (2019). Knockdown of STIM1 expression inhibits non-small-cell lung cancer cell proliferation in vitro and in nude mouse xenografts. *Bioengineered*, 10(1), 425-436. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1669518>

[g/10.1080/21655979.2019.1669518](https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1669518)

Hanahan, D. & Weinberg, R. A. (2011). Hallmarks of cancer: the next generation. *Cell*, 144(5), 646-674. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2011.02.013>

Humeau, J., Bravo-San-Pedro, J. M., Vitale, I., Nuñez, L., Villalobos, C., Kroemer, G., & Senovilla, L. (2018). Calcium signaling and cell cycle: Progression or death. *Cell Calcium*, 70, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.ceca.2017.07.006>

Jardin, I., Diez-Bello, R., Falcon, D., Alvarado, S., Regodon, S., Salido, G. M., Smani, T., & Rosado, J. A. (2021). Melatonin downregulates TRPC6, impairing store-operated calcium entry in triple-negative breast cancer cells. *Journal of Biological Chemistry*, 296, 100254. <https://doi.org/10.1074/jbc.RA120.015769>

Jin, M., Wang, J., Ji, X., Cao, H., Zhu, J., Chen, Y., Yang, J., Zhao, Z., Ren, T., & Xing, J. (2019). MCUR1 facilitates epithelial-mesenchymal transition and metastasis via the mitochondrial calcium dependent ROS/Nrf2/Notch pathway in hepatocellular carcinoma. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research*, 38(1), 136. <https://doi.org/10.1186/S13046-019-1135-X>

Jones, C. A. & Hazlehurst, L. A. (2021). Role of Calcium Homeostasis in Modulating EMT in Cancer. *Biomedicines*, 9(9), 1200. <https://doi.org/10.3390/biomedicines9091200>

Jung, J., Cho, K., Naji, A. K., Clemons, K. N., Wong, C. O., Villanueva, M., Gregory, S., Karagas, N. E., Tan, L., Liang, H., Rousseau, M. A., Tomasevich, K. M., Sikora, A. G., Levental, I., van-der-Hoeven, D., Zhou, Y., Hancock, J. F., & Venkatachalam, K. (2019). HRAS-driven cancer cells are vulnerable to TRPML1 inhibition. *EMBO Reports*, 20(4), e46685. <https://doi.org/10.15252/embr.201846685>

Karacicek, B., Erac, Y., & Tosun, M. (2019). Functional consequences of enhanced expression of STIM1 and Orai1 in Huh-7 hepatocellular carcinoma tumor-initiating cells. *BMC Cancer*, 19(1), 751. <https://doi.org/10.1186/S12885-019-5947-Z>

Lai, H. T., Canoy, R. J., Campanella, M., & Vassetzky, Y. (2022). Ca<sup>2+</sup> Transportome and the interorganelle communication in hepatocellular carcinoma. *Cells*, 11(5), 815. <https://doi.org/10.3390/cells11050815>

Lan, X., Zhao, J., Song, C., Yuan, Q., & Liu, X. (2019). TRPM8 facilitates proliferation and immune evasion of esophageal cancer cells. *Bioscience*

*Reports*, 39(10), BSR20191878. <https://doi.org/10.1042/BSR20191878>

Lee, S. H., Rigas, N. K., Lee, C. R., Bang, A., Srikanth, S., Gwack, Y., Kang, M. K., Kim, R. H., Park, N. H., & Shin, K. H. (2016). Orai1 promotes tumor progression by enhancing cancer stemness via NFAT signaling in oral/oropharyngeal squamous cell carcinoma. *Oncotarget*, 7(28), 43239-43255. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.9755>

Lehen'kyi, V., Flourakis, M., Skryma, R., & Prevarskaya, N. (2007). TRPV6 channel controls prostate cancer cell proliferation via Ca<sup>(2+)</sup>/NFAT-dependent pathways. *Oncogene*, 26(52), 7380-7385. <https://doi.org/10.1038/sj.onc.1210545>

Li, R. F., Man, Q. W., Liu, J. Y., Zheng, Y. Y., Gao, X., & Liu, H. M. (2021). Overexpression of T-type calcium channel Cav3.1 in oral squamous cell carcinoma: association with proliferation and anti-apoptotic activity. *Journal of Molecular Histology*, 52(3), 511-520. <https://doi.org/10.1007/S10735-020-09937-X>

Lin, D. C., Zheng, S. Y., Zhang, Z. G., Luo, J. H., Zhu, Z. L., Li, L., Chen, L. S., Lin, X., Sham, J. S. K., Lin, M. J., & Zhou, R. X. (2021a). TRPC3 promotes tumorigenesis of gastric cancer via the CNB2/GS K3β/NFATc2 signaling pathway. *Cancer Letters*, 519, 211-225. <https://doi.org/10.1016/J.CANLET.2021.07.038>

Lin, R., Bao, X., Wang, H., Zhu, S., Liu, Z., Chen, Q., Ai, K., & Shi, B. (2021b). TRPM2 promotes pancreatic cancer by PKC/MAPK pathway. *Cell Death & Disease*, 12(6), 585. <https://doi.org/10.1038/s41419-021-03856-9>

Liu, J., Chen, Y., Shuai, S., Ding, D., Li, R., & Luo, R. (2014). TRPM8 promotes aggressiveness of breast cancer cells by regulating EMT via activating AKT/GSK-3β pathway. *Tumour Biology*, 35(9), 8969-8977. <https://doi.org/10.1007/S13277-014-2077-8>

Liu, L., Wu, N., Wang, Y., Zhang, X., Xia, B., Tang, J., Cai, J., Zhao, Z., Liao, Q., & Wang, J. (2019). TRPM7 promotes the epithelial-mesenchymal transition in ovarian cancer through the calcium-related PI3K / AKT oncogenic signaling. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research*, 38(1), 106. <https://doi.org/10.1186/S13046-019-1061-Y>

Liu, Y., Jin, M., Wang, Y., Zhu, J., Tan, R., Zhao, J., Ji, X., Jin, C., Jia, Y., Ren, T., & Xing, J. (2020). MCU-induced mitochondrial calcium uptake pro-

motes mitochondrial biogenesis and colorectal cancer growth. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 5(1), 59. <https://doi.org/10.1038/S41392-020-0155-5>

Marchi, S., Giorgi, C., Galluzzi, L., & Pinton, P. (2020). Ca<sup>2+</sup> Fluxes and Cancer. *Molecular Cell*, 78(6), 1055-1069. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2020.04.017>

Miao, Y., Wang, X., Lai, Y., Lin, W., Huang, Y., Yin, H., Hou, R., & Zhang, F. (2021). Mitochondrial calcium uniporter promotes cell proliferation and migration in esophageal cancer. *Oncology Letters*, 22(3), 686. <https://doi.org/10.3892/OL.2021.12947>

Monet, M., Lehen'kyi, V., Gackiere, F., Firlej, V., Vandenberghe, M., Roudbaraki, M., Gkika, D., Pournier, A., Bidaux, G., Slomianny, C., Delcourt, P., Rassendren, F., Bergerat, J. P., Ceraline, J., Cabon, F., Humez, S., & Prevarskaya, N. (2010). Role of cationic channel TRPV2 in promoting prostate cancer migration and progression to androgen resistance. *Cancer Research*, 70(3), 1225-1235.

Monteith, G. R., Prevarskaya, N., & Roberts-Thomson, S. J. (2017). The calcium-cancer signalling nexus. *Nature Reviews Cancer*, 17(6), 367-380. <https://doi.org/10.1038/nrc.2017.18>

Moon, D. O. (2023). Calcium's role in orchestrating cancer apoptosis: Mitochondrial-centric perspective. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(10), 8982. <https://doi.org/10.3390/ijms24108982>

Morelli, M. B., Amantini, C., Tomassoni, D., Nabissi, M., Arcella, A., & Santoni, G. (2019). Transient Receptor Potential Mucolipin-1 Channels in Glioblastoma: Role in Patient's Survival. *Cancers*, 11(4), 525. <https://doi.org/10.3390/CANCERS11040525>

Morelli, M. B., Nabissi, M., Amantini, C., Tomassoni, D., Rossi, F., Cardinali, C., Santoni, M., Arcella, A., Oliva, M. A., Santoni, A., Polidori, C., Mariani, M. P., & Santoni, G. (2016). Overexpression of transient receptor potential mucolipin-2 ion channels in gliomas: role in tumor growth and progression. *Oncotarget*, 7(28), 43654. <https://doi.org/10.18632/ONCOTARGET.9661>

Motiani, R. K., Hyzinski-García, M. C., Zhang, X., Henkel, M. M., Abdullaev, I. F., Kuo, Y. H., Mastrougui, K., Mongin, A. A., & Trebak, M. (2013). STIM1 and Orai1 mediate CRAC channel activity and are essential for human glioblastoma invasion. *Pflugers Archive: European Journal of Physio-*

logy, 465(9), 1249-1260. <https://doi.org/10.1007/s00424-013-1254-8>

Müller, M., Gerndt, S., Chao, Y. K., Zisis, T., Nguyen, O. N. P., Gerwien, A., Urban, N., Müller, C., Gegenfurtner, F. A., Geisslinger, F., Ortler, C., Chen, C. C., Zahler, S., Biel, M., Schaefer, M., Grimm, C., Bracher, F., Vollmar, A. M., & Bartel, K. (2021). Gene editing and synthetically accessible inhibitors reveal role for TPC2 in HCC cell proliferation and tumor growth. *Cell Chemical Biology*, 28(8), 1119-1131.e27. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2021.01.023>

Pan, Y., Huang, J., Liu, K., Xie, C., Chen, H., Guo, Z., Guo, S., & Chen, Y. (2022). Orai1-mediated store-operated Ca<sup>2+</sup> entry promotes cervical cancer progression through IL-6 signaling. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 9, 1041674. <https://doi.org/10.3389/FMOLB.2022.1041674/BIBTEX>

Pathak, T., Gueguinou, M., Walter, V., Delierneux, C., Johnson, M. T., Zhang, X., Xin, P., Yeast, R. E., Emrich, S. M., Yochum, G. S., Sekler, I., Koltun, W. A., Gill, D. L., Hempel, N., & Trebak, M. (2020). Dichotomous role of the human mitochondrial Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>/Li<sup>+</sup> exchanger NCLX in colorectal cancer growth and metastasis. *eLife*, 9, 1-41. <https://doi.org/10.7554/eLife.59686>

Ren, T., Zhang, H., Wang, J., Zhu, J., Jin, M., Wu, Y., Guo, X., Ji, L., Huang, Q., Zhang, H., Yang, H., & Xing, J. (2017). MCU-dependent mitochondrial Ca<sup>2+</sup> inhibits NAD<sup>+</sup>/SIRT3/SOD2 pathway to promote ROS production and metastasis of HCC cells. *Oncogene*, 36(42), 5897-5909. <https://doi.org/10.1038/onc.2017.167>

Revathidevi, S. & Munirajan, A. K. (2019). Akt in cancer: Mediator and more. *Seminars in Cancer Biology*, 59, 80-91. <https://doi.org/10.1016/J.SEMCANCER.2019.06.002>

Roderick, H. L. & Cook, S. J. (2008). Ca<sup>2+</sup> signaling checkpoints in cancer: remodelling Ca<sup>2+</sup> for cancer cell proliferation and survival. *Nature Reviews Cancer*, 8(5), 361-375. <https://doi.org/10.1038/nrc2374>

Sanchez-Collado, J., Lopez, J. J., Cantonero, C., Jardin, I., Regodón, S., Redondo, P. C., Gordillo, J., Smani, T., Salido, G. M., & Rosado, J. A. (2022). Orai2 modulates store-operated Ca<sup>2+</sup> entry and cell cycle progression in breast cancer cells. *Cancers*, 14(1), 114. <https://doi.org/10.3390/CANCERS14010114/S1>

Schaefer, E. A. M., Stohr, S., Meister, M., Aigner, A., Gudermann, T., & Buech, T. R. H. (2013). Stimulation of the chemosensory TRPA1 cation channel by volatile toxic substances promotes cell survival of small cell lung cancer cells. *Biochemical Pharmacology*, 85(3), 426-438. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2012.11.019>

Singh, A. K., Roy, N. K., Bordoloi, D., Padmavathi, G., Banik, K., Khwairakpam, A. D., Kunnumakkara, A. B., & Sukumar, P. (2020). Orai-1 and Orai-2 regulate oral cancer cell migration and colonisation by suppressing Akt/mTOR/NF-κB signalling. *Life Sciences*, 261, 118372. <https://doi.org/10.1016/J.LFS.2020.118372>

Siow, W. X., Kabiri, Y., Tang, R., Chao, Y. K., Plesch, E., Eberhagen, C., Flenkenthaler, F., Fröhlich, T., Bracher, F., Grimm, C., Biel, M., Zischka, H., Vollmar, A. M., & Bartel, K. (2022). Lysosomal TRPML1 regulates mitochondrial function in hepatocellular carcinoma cells. *Journal of Cell Science*, 135(6), jcs259455. <https://doi.org/10.1242/jcs.259455>

Sritangos, P., Pena Alarcon, E., James, A. D., Sultan, A., Richardson, D. A., & Bruce, J. I. E. (2020). Plasma membrane Ca<sup>2+</sup> ATPase isoform 4 (PMCA4) has an important role in numerous hallmarks of pancreatic cancer. *Cancers*, 12(1), 1-22. <https://doi.org/10.3390/cancers12010218>

Sun, J., Lu, F., He, H., Shen, J., Messina, J., Mathew, R., Wang, D., Sarnaik, A. A., Chang, W. C., Kim, M., Cheng, H., & Yang, S. (2014). STIM1- and Orai1-mediated Ca<sup>2+</sup> oscillation orchestrates invadopodium formation and melanoma invasion. *Journal of Cell Biology*, 207(4), 535. <https://doi.org/10.1083/JCB.201407082>

Tajada, S. & Villalobos, C. (2020). Calcium permeable channels in cancer hallmarks. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 968. <https://doi.org/10.3389/FPHAR.2020.00968>

Thebault, S., Flourakis, M., Vanoverberghe, K., Vandermoere, F., Roudbaraki, M., Lehen'kyi, V., Slomianny, C., Beck, B., Mariot, P., Bonnal, J. L., Mauroy, B., Shuba, Y., Capiod, T., Skryma, R., & Prevarskaya, N. (2006). Differential role of transient receptor potential channels in Ca<sup>2+</sup> entry and proliferation of prostate cancer epithelial cells. *Cancer Research*, 66(4), 2038-2047. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-05-0376>

Umamura, M., Baljinnam, E., Feske, S., De-Lorenzo, M. S., Xie, L. H., Feng, X., Oda, K., Makino,

- A., Fujita, T., Yokoyama, U., Iwatsubo, M., Chen, S., Goydos, J. S., Ishikawa, Y., & Iwatsubo, K. (2014). Store-operated  $Ca^{2+}$  entry (SOCE) regulates melanoma proliferation and cell migration. *PLoS One*, 9(2), e89292. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0089292>
- Wan, H., Gao, N., Lu, W., Lu, C., Chen, J., Wang, Y., & Dong, H. (2022). NCX1 coupled with TRPC1 to promote gastric cancer via  $Ca^{2+}$ /AKT/ $\beta$ -catenin pathway. *Oncogene*, 41(35), 4169-4182. <https://doi.org/10.1038/S41388-022-02412-9>
- Wang, G., Cao, R., Qian, K., Peng, T., Yuan, L., Chen, L., Cheng, S., Xiong, Y., Ju, L., Wang, X., & Xiao, Y. (2020a). TRPM8 inhibition regulates the proliferation, migration and ROS metabolism of bladder cancer cells. *Onco Targets and Therapy*, 13, 8825-8835. <https://doi.org/10.2147/OTT.S257056>
- Wang, J., Liao, Q. J., Zhang, Y., Zhou, H., Luo, C. H., Tang, J., Wang, Y., Tang, Y., Zhao, M., Zhao, X. H., Zhang, Q. Y., & Xiao, L. (2014). TRPM7 is required for ovarian cancer cell growth, migration and invasion. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 454(4), 547-553. <https://doi.org/10.1016/J.BBRC.2014.10.118>
- Wang, T., Li, N., Jin, L., Qi, X., Zhang, C., & Hua, D. (2020b). The calcium pump PMCA4 prevents epithelial-mesenchymal transition by inhibiting NFATc1-ZEB1 pathway in gastric cancer. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Cell Research*, 1867(12), 118833. <https://doi.org/10.1016/J.BBAMCR.2020.118833>
- Wang, X., Li, Y., Li, Z., Lin, S., Wang, H., Sun, J., Lan, C., Wu, L., Sun, D., Huang, C., Singh, P. K., Hempel, N., Trebak, M., De-Nicola, G. M., Hao, J., & Yang, S. (2022). Mitochondrial calcium uniporter drives metastasis and confers a targetable cystine dependency in pancreatic cancer. *Cancer Research*, 82(12), 2254-2268. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-21-3230>
- Wang, X., Song, X., Cheng, G., Zhang, J., Dong, L., Bai, J., Luo, D., Xiong, Y., Li, S., Liu, F., Sun, Y., Wang, X., Li, Y., & Huang, Y. (2020c). The regulatory mechanism and biological significance of mitochondrial calcium uniporter in the migration, invasion, angiogenesis and growth of gastric cancer. *Onco Targets and Therapy*, 13, 11781-11794. <https://doi.org/10.2147/OTT.S262049>
- Wang, Y., Wang, H., Pan, T., Li, L., Li, J., & Yang, H. (2017). STIM1 silencing inhibits the migration and invasion of A549 cells. *Molecular Medicine Reports*, 16(3), 3283-3289. <https://doi.org/10.3892/MMR.2017.7010>
- Xia, J., Wang, H., Huang, H., Sun, L., Dong, S., Huang, N., Shi, M., Bin, J., Liao, Y., & Liao, W. (2016). Elevated Orai1 and STIM1 expressions upregulate MACC1 expression to promote tumor cell proliferation, metabolism, migration, and invasion in human gastric cancer. *Cancer Letters*, 381(1), 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2016.07.014>
- Xu, S., Cheng, X., Wu, L., Zheng, J., Wang, X., Wu, J., Yu, H., Bao, J., & Zhang, L. (2020). Capsaicin induces mitochondrial dysfunction and apoptosis in anaplastic thyroid carcinoma cells via TRPV1-mediated mitochondrial calcium overload. *Cellular Signalling*, 75, 109733. <https://doi.org/10.1016/j.cellsig.2020.109733>
- Yang, S., Zhang, J. J., & Huang, X. Y. (2009). Orai1 and STIM1 are critical for breast tumor cell migration and metastasis. *Cancer Cell*, 15(2), 124-134. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2008.12.019>
- Zhang, L., Au-Yeung, C. L., Huang, C., Yeung, T. L., Ferri-Borgogno, S., Lawson, B. C., Kwan, S. Y., Yin, Z., Wong, S. T., Thomas, V., Lu, K. H., Yip, K. P., Sham, J. S. K., & Mok, S. C. (2022b). Ryanodine receptor 1-mediated  $Ca^{2+}$  signaling and mitochondrial reprogramming modulate uterine serous cancer malignant phenotypes. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research*, 41(1), 242. <https://doi.org/10.1186/S13046-022-02419-W>
- Zhang, L. Y., Zhang, Y. Q., Zeng, Y. Z., Zhu, J. L., Chen, H., Wei, X. L., & Liu, L. J. (2020). TRPC1 inhibits the proliferation and migration of estrogen receptor-positive Breast cancer and gives a better prognosis by inhibiting the PI3K/AKT pathway. *Breast Cancer Research and Treatment*, 182(1), 21-33. <https://doi.org/10.1007/S10549-020-05673-8/FIIGURES/7>
- Zhang, P., Li, K., Wang, Z., Wu, Y., Zhang, H., Ma, F., Liu, X. Y., Tong, M. C. F., Ru, X., Zhang, X., & Zeng, X. (2022a). Transient receptor potential vanilloid type 4 (TRPV4) promotes tumorigenesis via NFAT4 activation in nasopharyngeal carcinoma. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 9, 1064366. <https://doi.org/10.3389/FMOLB.2022.1064366/BIBTEX>
- Zhao, H., Yan, G., Zheng, L., Zhou, Y., Sheng, H., Wu, L., Zhang, Q., Lei, J., Zhang, J., Xin, R., Jiang, L., Zhang, X., Chen, Y., Wang, J., Xu, Y., Li, D., & Li, Y. (2020). STIM1 is a metabolic checkpoint regu-

lating the invasion and metastasis of hepatocellular carcinoma. *Theranostics*, 10(14), 6483-6499. <https://doi.org/10.7150/THNO.44025>

Zhao, Y., Wang, J., & Liu, X. (2021). TRPV4 induces apoptosis via p38 MAPK in human lung cancer cells. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 54(12), e10867. <https://doi.org/10.1590/1414-431X2021E10867>

Zhou, Y., Gu, P., Li, J., Li, F., Zhu, J., Gao, P., Zang, Y., Wang, Y., Shan, Y., & Yang, D. (2017). Suppression of STIM1 inhibits the migration and invasion of human prostate cancer cells and is associated with PI3K/Akt signaling inactivation. *Oncology Reports*, 38(5), 2629-2636. <https://doi.org/10.3892/OR.2017.5961>



Imagen tomada de: Canva educativo

# Rasgos del docente universitario asociados a un perfil asesor de emprendimiento

## Traits of university professors associated with an entrepreneurial advisor profile

Daniel Eduardo Paz-Pérez<sup>1\*</sup>, Ma. Gabriela Mendoza-Hernández<sup>2</sup>

### RESUMEN

La extensión universitaria es una de las funciones sustantivas de las instituciones de educación superior, ya que permite su vinculación con el entorno económico, productivo y social mediante la participación activa del docente. Entre las formas más comunes de vinculación están las incubadoras de negocios y el asesoramiento de proyectos en eventos de emprendedores y concursos de ciencias, donde se evalúan las ideas de nuevos productos o servicios y se acompaña al estudiante en la puesta en marcha del negocio. El objetivo de esta investigación fue identificar si algunos rasgos del docente universitario están asociados con su involucramiento en actividades de emprendimiento. Se realizó un trabajo exploratorio y transversal apoyado en análisis estadístico, utilizando regresión logística binaria en el programa SPSS. Se probó un modelo predictor del involucramiento de los docentes en las actividades de emprendimiento a partir de sus conocimientos y labor de investigación. Los docentes que realizaban investigación científica presentaron 6 veces más probabilidades de involucrarse en actividades de emprendimiento que quienes no la realizaban; igualmente, se detectó que los docentes que contaban con conocimientos en temas de emprendimiento tenían 23 veces más probabilidades de involucrarse en tales actividades que quienes no contaban con ellos. Se identificó que 14 docentes respondían a un perfil completo de asesores de emprendimientos y otros 5 tenían un perfil parcial. Los factores como género, capacitación y el dominio informático de los docentes no se asociaron con el perfil buscado. Los docentes universitarios que más participaban en actividades emprendedoras fueron quienes contaban con conocimientos o experiencia en este campo, por encima de quienes solo realizaban investigación. Se recomiendan acciones institucionales que favorezcan el desarrollo de las habilidades y capacidades de emprendimiento en los profesores e investigadores, para fomentar la cultura educativa empresarial y de innovación que permitan impulsar el crecimiento económico.

**PALABRAS CLAVE:** emprendimiento, conocimientos, investigación, rasgos, universidad.

### ABSTRACT

Higher education outreach programs are one of the substantive functions of higher education institutions, since they allow institutions to be engaged with the economic, productive and social context through the active participation of teachers. Among the most common forms of outreach programs are business incubators and project consulting in entrepreneurial events and science competitions, where ideas for new products or services are evaluated and the student is guided through the business start-up. The objective of this research was to identify whether some traits of university teachers are associated with their involvement in entrepreneurship activities. An exploratory and cross-sectional work was carried out supported by statistical analysis, using binary logistic regression with the SPSS program. A predictive model of teachers' involvement in entrepreneurship activities was tested based on their knowledge and research work. Teachers who conducted scientific research were 6 times more likely to be involved in entrepreneurship activities than those who did not; likewise, it was found that teachers who had knowledge of entrepreneurship were 23 times more likely to be involved in such activities than those who did not have such knowledge. Fourteen teachers were identified as having a complete profile of entrepreneurship consultants and another five had a partial profile. Factors such as gender, training and computer proficiency of the teachers were not associated with the target profile. University professors who actively participated in entrepreneurial activities were those who had knowledge or experience in this field, above those who only carried out research. Institutional actions that favor the development of entrepreneurial skills and abilities in professors and researchers are recommended, to foster an educational culture of entrepreneurship and innovation that may enable economic growth.

**KEYWORDS:** entrepreneurship, knowledge, research, traits, university.

\*Correspondencia: depaz@itsmante.edu.mx/Fecha de recepción: 2 de mayo de 2024/Fecha de aceptación: 12 de septiembre de 2024/Fecha de publicación: 20 de septiembre de 2024.

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de El Mante, carretera Mante-Valles km 7.5, congregación Quintero, Tamaulipas, México, C. P. 89930. <sup>2</sup>Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica Multidisciplinaria Mante, Ciudad Mante, Tamaulipas, México, C. P. 89840.

## INTRODUCCIÓN

La docencia es el *leitmotiv* (motivo central) de las universidades e instituciones de educación superior (IES) modernas y constituye una de sus tres funciones sustantivas, junto con la investigación y la extensión. Éstas se llevan a cabo en forma cotidiana por docentes que además generan o aplican conocimientos, investigan ciencia, transfieren tecnología o realizan tutoría y mentoría, consideradas funciones intrínsecamente relacionadas (Sánchez-García y col., 2017; Castro-Maldonado y col., 2023). La docencia es la función más estudiada de las tres, razón por la que es muy reconocida la importancia social del docente; y la investigación es la función menos desarrollada de todas, según reportó el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia (2014), citado en Rojas y col. (2019) y Barreras-Beltrán y Castillo-Ochoa (2021).

La extensión es un elemento transversal en relación a las demás funciones sustantivas de la universidad, que vincula a ésta con su entorno, algunas de sus actividades propician el desarrollo local y regional y traen beneficios económicos a la comunidad (Sanabria-Rangel y col., 2015; Saldarriaga-Salazar y Guzmán-González, 2018), por lo cual, resulta ser un espacio idóneo para identificar las actitudes emprendedoras de los estudiantes por medio de programas educativos que impulsan y materializan las ideas de negocios (Cardona-Arbeláez y col., 2017; Martínez-Garcés y col., 2021). Una buena práctica de los docentes para impulsar estas actitudes es identificar los proyectos con potencial emprendedor y direccionarlos a los servicios de acompañamiento de la institución, como las incubadoras o los centros de apoyo al emprendimiento, los cuales están entre los mecanismos más usuales de extensión en Latinoamérica (Orozco-Triana y col., 2016; Guatemala-Mariano y Echeverría-Fuentes, 2022).

Respecto a la enseñanza del emprendimiento, Saldarriaga-Salazar y Guzmán-González (2018) estudiaron los métodos más usuales y encon-

traron que en muchos países se utiliza más un modelo de negocios que un modelo de enseñanza de emprendimiento formal, coincidiendo con Sanabria-Rangel y col. (2015: 123), de que en muchas instituciones se concede mayor importancia a la creación del negocio que a la formación del emprendedor, lo que puede dificultar los primeros años de vida de las nuevas empresas. Son muchos los aspectos que la literatura recoge sobre el perfil del emprendedor, a quien se le concibe como “aquel que corre riesgos en el comercio, sin tener certeza de éxito” (Cantillón, 1997, citado por Aguirre-González, 2017); sin embargo, Rojas y col. (2019) señalaron que, la literatura es escasa en la búsqueda del perfil del docente universitario formador de emprendedores.

Un ecosistema emprendedor puede considerarse como una comunidad donde interactúan personas, recursos y procesos que posibilitan el nacimiento de un negocio, en el que es vital el soporte de quienes participan en la enseñanza de las competencias emprendedoras (Isenberg, 2011, citado por Bóveda y col., 2015; Sarabia-Huerta y Delhumeau-Rivera, 2019). Este ecosistema involucra a distintos actores, como el emprendedor mismo, la institución y sus docentes, asesores y especialistas externos, empresarios y redes de contacto (Orozco-Triana y col., 2016; Ács y col., 2020); un ecosistema emprendedor moderno se basa en la colaboración, apoyándose en programas de formación, incubación y aceleración de empresas, que permiten una polinización más diversa y creativa (Trujillo, 2019).

En opinión de Monsalve-Serrano (2013) una persona puede transitar con su proyecto emprendedor en forma aislada o acompañado de otros individuos, o bien con la ayuda de un asesor; esto último coincide con Orozco-Triana y col. (2016), quienes plantearon que, para que el proceso de incubación sea eficiente, el emprendedor debe ser acompañado por un docente asesor que le ayude a formular o mejorar su plan de negocios, co-

mo también sugieren Cristancho-Triana y col. (2021). Un asesor de negocios es una persona que posee “un perfil profesional altamente calificado, que comprende conocimientos técnicos, habilidades y experiencia relacionadas con emprendimientos” y ofrece su asesoramiento para la puesta en marcha de nuevos negocios (Quiñones-Herrera y Díaz-Pérez, 2021); en este texto se ha optado por usar indistintamente asesor de negocios o asesor de emprendimientos.

Es común que los docentes con más experiencia participen en las incubadoras y consultoras cuando ya han recibido la capacitación necesaria, ya que la asesoría en emprendimiento puede ser vista como un reto importante por docentes jóvenes o inexpertos. Gutiérrez-Rodríguez y col. (2016) y Orozco-Triana y col. (2016) sugieren que, las aceleradoras de incubación se apoyen también en empresarios locales y en estudiantes avanzados, para visibilizar sus servicios y ofrecer al usuario espacios y redes de contactos que posibiliten la germinación de su idea de negocio.

Los proyectos de negocios acompañados tienen mayores oportunidades de éxito si se basan en la innovación, además de que se puede potenciar su creación si se apoyan en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), por lo cual es deseable que los asesores tengan experiencia en ellas y puedan compartirla con el emprendedor (Cardona-Arbeláez y col., 2017).

Toda la información que reciben los futuros emprendedores para la creación de su negocio debe ser validada por un experto, por lo que este actor principal del ecosistema emprendedor debe trabajar con excelencia, sugieren Bóveda y col. (2015). Los asesores de emprendimientos deben ser personas especializadas en alguna área del conocimiento para evaluar las propuestas del emprendedor y es deseable que conozcan de otras disciplinas y que tengan experiencia en la industria o el mercado (Baca-Urbina, 2013).

Varios autores han buscado identificar algunos rasgos de los asesores en emprendimiento. Pertuz-Peralta y col. (2016) definen a los asesores como facilitadores y comunicadores, con capacidad de enseñar, adaptabilidad y empatía, responsables, respetuosos, motivadores e innovadores; para Sánchez-García y col. (2017) el asesor es un multiplicador de ideas y facilitador de conocimientos, pero debe contar con experiencia y educación en temas de emprendimiento. El docente consultor también debe saber trabajar en equipos interdisciplinarios, afirman Guatemala-Mariano y Echeverría-Fuentes (2022). Del-Solar (2010), citado por Rojas y col. (2019), establece que el conocimiento es un componente del perfil del docente que forma emprendedores, ya que las experiencias aprendidas le permiten ayudar al estudiante a desarrollar un aprendizaje significativo.

También Cardona-Arbeláez y col. (2017) propusieron una serie de competencias para motivar el espíritu emprendedor desde la academia: competencias interpersonales (saber) como la comunicación, el trabajo en equipo y el manejo del tiempo; competencias instrumentales (saber ser) como la planificación, el conocimiento del mercado y las habilidades informáticas, y competencias sistémicas (saber hacer) como la gestión del talento humano y la adaptación al cambio. En el mismo tenor, Almagro-Gavira y Manzano-Soto (2017), en su reseña de un programa dirigido al emprendimiento universitario en España, valoraron otras habilidades del asesor de emprendimientos: el compromiso para transformar la idea en un negocio, la capacidad de gestión, la facilidad para obtener fondos para el proyecto y la experiencia trabajando en asociación con otros. A su vez, Monsalve-Serrano (2013) planteó que el asesor debe auxiliar al emprendedor a aterrizar su idea ajustando los tiempos y gestionando los recursos necesarios, para lo cual puede ser muy útil la experiencia en investigación, explotando la creatividad y el pensamiento lateral.

En los últimos años hay un especial interés en los recursos humanos universitarios y en sus habilidades (Sanabria-Rangel y col., 2015), dando como resultado una nueva necesidad de analizarlos y por medio de ello, identificar su potencial.

El objetivo de este estudio fue identificar si algunos rasgos del docente universitario están asociados con su involucramiento en actividades de emprendimiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo fue de tipo exploratorio y transversal, apoyado en análisis estadístico. La investigación se llevó a cabo en el periodo de junio a diciembre de 2023, en el Instituto Tecnológico Superior El Mante (ITS El Mante), uno de los 122 campus descentralizados del Tecnológico Nacional de México (TecNM), que en el año 2020 presentaba una población estudiantil de 1 001 jóvenes (Chávez-Sáenz y Norzagaray-Gamez, 2023). Ciudad Mante, ubicada en el sur de Tamaulipas, México, tiene una población universitaria de aproximadamente 4 000 alumnos distribuidos en 2 IES públicas y 6 privadas.

### Variables e instrumento

Se establecieron cinco posibles detonantes (variables) del involucramiento de los docentes en actividades de emprendimiento: género, conocimientos sobre emprendimiento, investigación, capacitación y dominio informático. Se diseñó un instrumento de investigación conteniendo una sección para recoger las características de los docentes incluyendo el género como variable 1, además de 7 preguntas sobre la edad, profesión, universidad de origen, academia a la que pertenecen, antigüedad, nivel de estudios y reconocimientos. Y 5 preguntas abiertas para conocer sus opiniones sobre motivación, competencia y práctica docente. El instrumento fue aplicado en una prueba piloto a 10 docentes de todas las carreras en el ITS El Mante que aceptaron participar voluntariamente; para su validación se consultó a 3 investigadores de 2 universidades locales con experiencia en investigación social, quienes sugirieron eliminar las preguntas abiertas

a fin de acotar el instrumento al tema de emprendimiento, solo con el enfoque cuantitativo, ya que las respuestas recabadas en esta etapa no eran concluyentes; también, propusieron eliminar las preguntas respecto a la edad, profesión y universidad de origen (quedando 5 preguntas), que se consideraron no relevantes para el propósito, conforme a la literatura.

El instrumento final contenía 5 variables correspondientes a 5 dimensiones y 23 ítems. El género del docente (variable 1: 2 ítems), que estaba incluida en la primera sección. La segunda sección contenía 21 ítems para recoger la experiencia del docente en los temas de conocimientos sobre emprendimiento (variable 2: 4 ítems), que considera si ha estado en contacto con emprendedores o si ha recibido instrucción en el tema, incluso otorgado instrucción como impartir cátedra o tomar un curso; experiencia en investigación científica (variable 3: 4 ítems), con productos tales como antologías, artículos científicos, tesis y proyectos de investigación; experiencia en capacitación (variable 4: 6 ítems), tanto dentro como fuera de su institución educativa, considerando si cuenta con certificaciones para impartir capacitación; nivel de dominio de software informático (variable 5: 7 ítems), entendiendo que una computadora personal es una herramienta necesaria en la docencia. Finalmente, se agregó la variable 6 de respuesta (con 5 ítems), donde se propuso un perfil de asesor de emprendimientos basado en el involucramiento que tiene el docente en tales actividades (Tabla 1).

Para las variables predictoras 2, 3 y 4, así como para la variable de respuesta, se propuso una escala dicotómica donde 0 es el valor si el docente refiere “No” como respuesta a todas las preguntas que corresponden a la dimensión evaluada, y 1 es el valor si cualquiera de ellas fue respondida con “Sí”, es decir, que no se sumaron las respuestas sino que responder “Sí” a cualquiera de ellas generó un valor de 1 en la variable. La variable 5, Dominio de software informático, fue codificada en escala ordinal de 5 ni-

■ **Tabla 1. Variables predictoras y de respuesta, sus indicadores y codificación.**  
Table 1. Predictor and response variables, their indicators and coding.

<b>Variabes predictoras</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Codificación</b>	
Género	Género del docente	Hombre	1	
		Mujer	0	
Conocimiento	Conocimientos sobre emprendimiento	Ha acompañado a un emprendedor en su proyecto	1	
		Ha recibido instrucción en emprendimiento	1	
		Ha impartido instrucción en emprendimiento	1	
		Ninguno	0	
Investigación	Experiencia en investigación científica	Ha realizado investigación científica	1	
		Ha publicado artículos científicos	1	
		Ha dirigido tesis o proyectos de investigación	1	
		Ninguno	0	
Capacitación	Experiencia en capacitación	Ha impartido capacitación a asesores de empresas	1	
		Ha impartido cursos a personal docente	1	
		Ha impartido cursos a personal administrativo	1	
		Ha impartido cursos en la industria	1	
		Está certificado para impartir capacitación	1	
		Ninguno	0	
Dominio informático	Nivel de dominio de software	Nivel de dominio suficiente	1	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• suites ofimáticas 1 a 5</li> <li>• bases de datos 1 a 5</li> <li>• sistemas ERP 1 a 5</li> <li>• software administrativo 1 a 5</li> <li>• software de diseño 1 a 5</li> <li>• software estadístico 1 a 5</li> </ul>		
	Nivel de dominio insuficiente	0		
<b>Variable de respuesta</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>		<b>Codificación</b>
Involucramiento	Perfil asesor de emprendimientos	Ha realizado un emprendimiento personal		1
		Ha asesorado proyectos en evento emprendedor		1
		Ha asesorado e incubado un proyecto exitoso	1	
		Ha sido asesor de proyectos en concursos de ciencias	1	
		Ninguno	0	

veles, ya que el docente evaluó su nivel de dominio de cada tipo de software con valores de 1 = nulo, 2 = insuficiente, 3 = suficiente, 4 = moderado y 5 = completo, por lo que se utilizó el promedio de las 6 categorías, para codificar como insuficiente a los promedios < 3 y como suficiente para los promedios > 3 (Tabla 1).

### **Población y muestra**

La población de estudio la conformó la totalidad del personal académico de tiempo completo del campus (42 docentes). Se excluyeron 5 profesores que solo impartían actividades extraescolares como deportes, música y pintura, por lo que, de los restantes 37, se seleccionó una muestra aleatoria simple, con

un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 %, resultando 34 personas a quienes se pidió contestar el instrumento en forma auto aplicada en papel.

**Procedimiento**

Se construyó una matriz de datos con la información y se introdujo en el programa para las ciencias sociales (SPSS, por sus siglas en inglés: Statistical Package for the Social Sciences) versión 28.

Dado que la variable de respuesta es categórica, se buscó realizar una regresión logística binaria, que es una técnica estadística apropiada para utilizarse cuando las variables son ordinales dicotómicas, en la que los oddratio (OR) calculados representan la probabilidad de ocurrencia de un evento comparado con la probabilidad de que no ocurra (Ochoa-Sangrador, 2019; Kappes y Riquelme, 2021).

La metodología de la regresión logística binaria supone la existencia de una variable dependiente dicotómica *Y* mutuamente excluyente (por ejemplo, hombre o mujer) y una o más variables cualitativas independientes  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (Berea-Baltierra y col., 2014); para comprobar la relación entre las variables se utilizaron las pruebas Ji cuadrada y Prueba exacta de Fisher.

**Prueba de Ji cuadrada**

Se realizó una prueba de contraste de hipótesis Ji cuadrada a cada una de las variables en estudio; en el caso de las variables capacitación y dominio se esperaba un recuento menor que 5 en el 50 % de sus casillas, por lo que se complementó el análisis con otra prueba no paramétrica (Ochoa-Sangrador, 2019: 122).

**Prueba exacta de Fisher**

Se analizaron los datos mediante la prueba de Fisher para muestras independientes reducidas. En la comprobación de la asociación de las variables se encontraron algunos resultados individuales no significativos.

Para realizar la regresión logística binaria se siguió la sugerencia de Berea-Baltierra y col. (2014) de utilizar todas las variables predictoras establecidas con la finalidad de estudiar su comportamiento en el modelo, ya que han sido reportadas en la literatura.

Una vez probada la asociación de algunas variables en forma significativa, se construyó un modelo predictivo para demostrar que los cambios en el comportamiento de las variables independientes  $x_1, x_2, \dots, x_n$  produjeron cambios en la variable de respuesta *y*. Este modelo de regresión logística puede expresarse con la fórmula (1):

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \dots + b_nx_n \quad (1)$$

Donde:

*p* = es la probabilidad de que *y* (variable dependiente) tome el valor 1 en presencia de las covariables *x*

$b_0$  = intercepto o constante de regresión

$b_1, b_2, b_3, b_n$  = coeficientes de las covariables en el modelo de regresión

$x_1, x_2, x_3, x_n$  = variables cualitativas independientes

Por tanto, la probabilidad de ocurrencia del evento puede expresarse con la fórmula (2):

$$p = \frac{1}{1+e^{-y}} \quad (2)$$

Donde:

*p* = probabilidad o riesgo de que ocurra el evento de interés

*e* = constante de Euler

*y* = distribución normal estandarizada

La regresión logística binaria no requiere normalidad de los datos, ni igualdad de varianzas, pero sí proporcionalidad de los OR o razón de probabilidad (Dagnino, 2014); tampoco requiere de homocedasticidad, ni linealidad porque las variables son categóricas, pero sí requiere que no haya multicolinealidad y que se cumpla la bondad de ajuste si se trata de modelos predictivos (Ortega-Páez

y col., 2022). Para verificar el cumplimiento de los supuestos, en primer término se obtuvo la distribución de las frecuencias de las variables dicotómicas, como se observan en la Tabla 2.

Para encontrar la influencia entre las variables dicotómicas se realizó un análisis bivariado, tipo estudio de casos y controles conforme a Ochoa-Sangrador (2019: 46), mediante una tabla de contingencia 2 x 2, expresada como (3):

$$\frac{a}{c} \quad \frac{b}{d} \quad (3)$$

donde las filas representan el resultado de ocurrencia (presente o ausente), en este caso el involucramiento de los docentes en actividades de emprendimiento, mientras las columnas representan los factores de riesgo o exposición; en la fila superior se encontrarán los sujetos que se involucran en emprendimiento y en la fila inferior los que no se involucran, mientras que en las columnas

se encontrarán las personas con la característica buscada en el grupo estudiado y las personas sin tal característica, como hacer investigación (grupo de casos), y no hacer investigación (grupo de control).

La probabilidad del resultado de involucramiento de los docentes en las actividades de emprendimiento, de que ocurra entre el grupo que sí presentan la característica buscada y el grupo que no presenta tal característica, es igual al resultado de la ecuación (4), y se le denomina razón de ventajas o razón de OR.

$$\frac{ad}{bc} \quad (4)$$

### Procesamiento de datos

Se utilizó el método de pasos sucesivos hacia adelante (razón de verosimilitud), con el que se busca determinar las variables mínimas que expliquen el modelo, en función del principio de parsimonia (navaja de Ockham) mediante el software SPSS.

■ **Tabla 2. Codificación y frecuencia de la variable dependiente y las variables categóricas.**  
Table 2. Coding and frequency of dependent variable and categorical variables.

<b>Codificación de variable dependiente</b>			
<b>Involucramiento</b>		<b>Frecuencia</b>	<b>Valor interno</b>
No se involucra		15	0
Sí se involucra		19	1
<b>Codificación de variables categóricas</b>			
<b>Variable</b>	<b>Categoría</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Codificación de parámetro</b>
Género	Mujer	17	0.000
	Hombre	17	1.000
Conocimiento	No conoce emprendimiento	13	0.000
	Sí conoce emprendimiento	21	1.000
Investigación	No hace investigación	11	0.000
	Sí hace investigación	23	1.000
Capacitación	No hace capacitación	6	0.000
	Hace capacitación	28	1.000
Dominio	Insuficiente	14	0.000
	Suficiente	20	1.000

Al realizar la prueba de ómnibus de coeficientes del modelo, la iteración se detuvo en el segundo paso. El resumen del modelo calculado también arrojó un logaritmo de verosimilitud de 24.872 en la sexta iteración, con un R cuadrado de Cox y Snell de 0.473, que es un valor ligeramente aproximado al R cuadrado de Nagelkerke de 0.634, un valor alto del coeficiente de determinación que explica el 63 % del cambio en la variable dependiente y ambos son valores confiables en el análisis, de acuerdo con Ortega-Páez y col. (2022).

El procedimiento de regresión adicionó las variables significativas hasta aumentar el número de ellas a 2 en el resultado del segundo paso, que fueron conocimientos e investigación; se comprobó la proporcionalidad de los log-odds en las variables añadidas al modelo, lo que refleja que los efectos de las variables predictoras fueron constantes en todas las categorías de la variable dependiente.

Se realizó la prueba de bondad de ajuste de Hosmer y Lemeshow, para comprobar si el modelo propuesto en la regresión logística binaria podía explicar lo que se observaba. El resultado no debe ser estadísticamente significativo (Ortega-Páez y col., 2022) y en el modelo calculado se obtuvo un valor de 0.943, el cual es un buen indicador del ajuste. También se realizó todo el procedimiento con el método de pasos sucesivos hacia atrás, pero su modelo incluyó otras variables, que no contribuyeron a explicar mejor la respuesta y se rechazó el resultado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los 34 docentes entrevistados, 19 (55.8 %) informaron realizar al menos alguna de las actividades para estar involucrados en actividades de emprendimiento: 16 tuvieron un emprendimiento personal, 10 fueron asesores de proyectos en eventos emprendedores, 7 ayudaron a incubar exitosamente un proyecto y 11 fueron asesores en concursos de ciencias. También, 21 docentes (el 61.7 % del total) contaban con conocimiento en temas

de emprendimiento: 17 acompañaron a un emprendedor, 15 tomaron algún curso de emprendimiento y 11 impartieron tales cursos. Sobre la variable 3, 23 docentes reportaron hacer investigación científica: 20 a nivel básico, 11 publicaron artículos en revistas nacionales e internacionales y 4 han dirigido tesis o proyectos de investigación (Tablas 1 y 2).

Entre las características sociodemográficas de la muestra estudiada, se observó que el género se distribuye equitativamente al 50 %, con una antigüedad laboral media que superaba los 9 años. Más del 85 % de la plantilla tenía estudios de posgrado y 2 doctores estaban inscritos en el Sistema Nacional de Investigadores (SNI) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt) (Tabla 3).

En la institución se había creado un Centro de Innovación e Incubación de Empresas (CIIE) aún sin registro ante la Secretaría de Economía federal, en el que al menos 7 docentes habían reportado actividades de asesoría de negocios.

Mediante la prueba de Ji cuadrada y la Prueba exacta de Fisher se encontró que, las mismas dos variables significativas de la regresión logística binaria mantienen la asociación con la variable dependiente, ya que resultaron menores que el valor de significancia en el análisis y se puede rechazar la hipótesis nula de independencia de las variables (Tabla 4).

El género de los docentes no mostró estar relacionado con su involucramiento en actividades de emprendimiento, como tampoco la capacitación, ni el dominio informático, ya que sus valores en los Intervalos de Confianza al 95 % [IC95 %] incluyen al cero. La investigación si mostró relación, el 69.5 % del personal que realizaba esta actividad se involucraba también en actividades de emprendimiento; mientras que solo 27.2 % del personal que no la realizaba se involucraba. El análisis de esta población permitió inferir que,

■ **Tabla 3. Plantilla docente del Tecnológico Nacional de México/ITS El Mante.**  
Table 3. Teaching staff of the Tecnológico Nacional de México/ITS El Mante.

Academia de pertenencia (Ingeniería):	Antigüedad	Género		Nivel de estudios			Reconocimientos	
	Años como docente en la institución	Hombres	Mujeres	Licenciatura	Maestría	Doctorado	Perfil deseable SEP	Conahcyt
Industrial	10.9	6	4	2	5	3 <sup>a</sup>	1	0
Sistemas Computacionales	9.1	3	4	0	5	2 <sup>a</sup>	0	0
Gestión Empresarial	9.8	3	5	2	4	1 1 <sup>a</sup>	2	1
Innovación agrícola	5	3	1	1	2	1	1	1
Química	7.2	2	3	0	5	0	0	0
Total	9.1	17	17	5	21	8	4	2

<sup>a</sup>Candidatos a Doctor, sin título.

■ **Tabla 4. Rasgos del docente asociados al involucramiento en actividades de emprendimiento.**  
Table 4. Teacher traits associated with their involvement in entrepreneurship activities.

Variable		Se involucran		Ji cuadrada p-value	Prueba exacta de Fisher (bilateral)	OR (IC95 %)
		Sí (n)	No (n)			
Sexo	H	7	10	0.084	0.166	3.428 5 (0.82 a 14.20) <sup>a</sup>
	M	12	5			
Hacen investigación	Sí	16	7	0.021	0.030	6.095 2 (1.235 a 30.092)
	No	3	8			
Conocen de emprendimiento	Sí	17	4	0.000	0.000	23.375 (3.64 a 150.02)
	No	2	11			
Dan capacitación	Sí	16	12	0.749	1.000	1.333 (0.22 a 7.80) <sup>a</sup>
	No	3	3			
Dominio informático suficiente	Sí	12	8	0.563	1.000	1.5 (0.378 a 5.948) <sup>a</sup>
	No	7	7			

Nota: <sup>a</sup>No son significativos. R<sup>2</sup> 0.473 (Cox y Snell), 0.634 (Nagelkerke), Modelo X<sup>2</sup> = 24.872, gl = 3. Test de Hosmer y Lemeshow = 0.943

dedicarse a la investigación aumentó 6 veces la probabilidad de los docentes de involucrarse en actividades de emprendimiento (Tabla 4). Se sabe que la investigación puede transformar la práctica docente y mejorar la labor del profesor universitario, ya que le permite

estructurar su conocimiento profesional (Muñoz-Martínez y Garay-Garay, 2015); lo anterior propicia que, un buen investigador pueda diagnosticar problemas e identificar soluciones o generar nuevos conocimientos (Castro-Maldonado y col., 2023), algo que pueden lo-

grar los docentes del ITS El Mante, ya que quienes realizaban investigación científica o dirigían tesis fueron quienes más se involucraban, asesorando proyectos emprendedores o proyectos de innovación para concursos de ciencias.

El conocimiento sobre emprendimiento mostró asociación con el involucramiento en este tipo de actividad: el 80.9 % de los profesores que tenían conocimiento de temas de emprendimiento se involucraba cotidianamente en actividades educativas relacionadas a esta acción, mientras que solo el 15.4 % de los que no tenían este tipo de conocimiento también lo hacía; el resultado de la razón de momios sugiere que hay 23 veces más probabilidad de involucrarse en actividades de emprendimiento si se ha tomado un curso, acompañado a un emprendedor en un proyecto o impartido una clase sobre el emprendimiento, que si se desconocen estos temas (Tabla 4).

En la búsqueda del perfil del asesor en negocios, los resultados de este trabajo concuerdan parcialmente con la propuesta de Pertuz-Peralta y col. (2016), quienes consideraron como rasgos del docente que asesora a emprendedores, sus conocimientos y habilidades, y encontraron que los docentes que realizaban esta labor tenían muy alto nivel de conocimiento sobre el tema de emprendimiento (p. 43). De igual forma, coinciden con Bóveda y col. (2015), quienes señalaron que el asesor de emprendimientos debe contar con conocimientos especializados en diversas disciplinas y tener experiencia para asesorar a empresas u otros emprendedores.

El uso de las TIC juega un papel crucial en los emprendimientos, ya que las nuevas modalidades de negocios como el e-branding y el e-commerce, por citar algunos, requieren del dominio de herramientas tecnológicas que puede brindar un asesor actualizado en el mundo digital (Cardona-Arbeláez y col., 2017; Castro-Maldonado y col., 2023); además, se ha encontrado que el dominio de software de aná-

lisis de datos permite incrementar la productividad académica en investigación (Barreras-Beltrán y Castillo-Ochoa, 2021), por ello, resulta interesante que la variable dominio informático no haya resultado significativa en el análisis, lo cual podría significar que las actividades emprendedoras en las que se involucran los docentes de esta institución no requieren del uso cotidiano de TIC sino de otras herramientas de mayor utilidad en las cinco carreras de ingeniería que se imparten en ella.

A partir de los resultados de este trabajo se obtuvo la ecuación de regresión logística para el perfil asesor de emprendimientos en la institución, que puede ser expresada como (5):

$$Y = -3.967 + 3.905 (\text{Conocimientos}) + 2.805 (\text{Investigación}) \quad (5)$$

### Comprobación

Con la ecuación anterior, se puede calcular la probabilidad de involucramiento de un docente que nunca ha emprendido un proyecto, ni ha tomado cursos del tema, ni ha impartido materias, y tampoco ha publicado ningún artículo académico, utilizando la codificación dicotómica; ya que la variable dependiente es categórica,  $Y = 0$  denota ausencia de involucramiento y  $Y = 1$  confirma la presencia del mismo.

$$Y = -3.967 + 3.905 (0) + 2.805 (0) = -3.967$$

$$p (\text{involucrar}) = \frac{1}{1 + e^{-y}} = \frac{1}{1 + e^{3.967}} = 0.02$$

De igual forma, se puede obtener la probabilidad de involucramiento de un docente que, sí tiene los conocimientos sobre el emprendimiento y que también realiza investigación científica.

$$Y = -3.967 + 3.905 (1) + 2.805 (1) = 2.743$$

$$p (\text{involucrar}) = \frac{1}{1 + e^{-y}} = \frac{1}{1 + e^{-2.743}} = 0.94$$

Si un docente solamente realiza investigación pero no tiene conocimientos sobre emprendimiento, la probabilidad de involucrarse sería:

$$Y = -3.967 + 3.905(0) + 2.805(1) = -1.162$$

$$p(\text{involucrar}) = \frac{1}{1 + e^{-y}} = \frac{1}{1 + e^{1.162}} = 0.24$$

Por último, la probabilidad de involucramiento de un docente que solo tiene conocimientos sobre emprendimiento pero no realiza investigación científica estaría dada por:

$$Y = -3.967 + 3.905(1) + 2.805(0) = -0.062$$

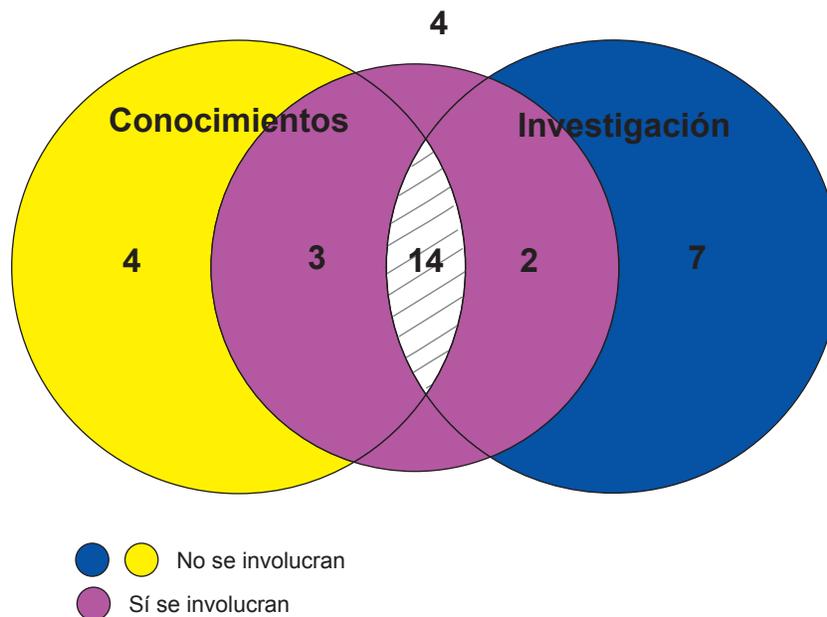
$$p(\text{involucrar}) = \frac{1}{1 + e^{-y}} = \frac{1}{1 + e^{0.062}} = 0.48$$

La tabla de valores pronosticados por SPSS arrojó que un 82.4 % del total de 34 docentes de la institución fueron clasificados correctamente, con un valor de corte de 0.500; también se obtuvieron los valores de especifici-

dad moderada de 73.7 % y de sensibilidad alta de 93.3 % del modelo predictivo, acordes con Ortega-Páez y col. (2022).

De la muestra total de 34 entrevistados (Figura 1), 19 se involucraban en actividades de emprendimiento, y de ellos, 14 docentes tuvieron un perfil completo de asesor de negocios, ya que poseían conocimientos de emprendimiento y también realizaban investigación (el área que cubren los 3 círculos), y 5 contaban con un perfil parcial, ya que 3 tenían conocimientos, pero no investigaban y 2 realizaban investigación, pero no tenían los conocimientos. De los 15 docentes que no se involucraban en actividades de emprendimiento, 4 tenían conocimientos y 7 hacían investigación, mientras que 4 docentes no tenían conocimientos, ni realizaban investigación (el área fuera de los círculos).

De los 13 docentes que no tenían conocimientos de emprendimiento, 9 hacían investigación, pero solo 2 se involucraban en em-



■ Figura 1. Diagrama de Venn de número de docentes con rasgos asociados al perfil asesor de emprendimientos.

Figure 1. Venn diagram of the number of teachers with traits associated with entrepreneurial consultant profile.

prendimiento (el área morada del círculo Investigación), y 7 no intervenían (el área azul del círculo Investigación); De los 11 docentes que no realizaban investigación, 7 sí tenían conocimientos en el tema, pero solo 3 se involucraban en emprendimiento (el área morada del círculo Conocimientos) y 4 no intervenían (el área amarilla del círculo Conocimientos).

Almagro-Gavira y Manzano-Soto (2021) reportaron que, la inexperiencia y falta de conocimiento en temas de emprendimiento, en particular en el área de administración de empresas, son las principales barreras que los nuevos emprendedores señalan como inhibidores por los cuales abandonan sus proyectos; por ello, es deseable que sean los docentes con mayor experiencia en esas áreas, quienes acompañen a los estudiantes universitarios en sus proyectos de emprendimiento, incluso se pueden requerir habilidades esenciales para formar parte de un centro de apoyo o incubadora de negocios. Para Quiñones-Herrera y Díaz-Pérez (2021) un asesor de negocios efectivo debe tener los conocimientos y la experiencia relacionadas con el fenómeno del emprendimiento, porque le permitirán tener mejor impacto en su ejercicio profesional; así que el resultado encontrado en la dimensión conocimientos confirma lo anterior, ya que 21 de 34 docentes del ITS El Mante que contaban con experiencia en contenidos relacionados con emprendimiento, han acompañado a un amigo o familiar en un proyecto emprendedor y/o han emprendido ellos mismos alguna vez, y esta fortaleza les permite involucrarse con seguridad en actividades relacionadas con el desarrollo de nuevos negocios, poniendo sus conocimientos a disposición de los estudiantes. Aunque el 80.9 % (17) de los que conocen estos temas participaron en emprendimiento, al menos el 84.6 % (11) de los que no conocen no habían intervenido y, de ellos (Tabla 4), dos terceras partes (7 de 11) sí han realizado investigación cotidiana (Figura 1). Para garantizar que se involucren en la educación emprendedora, en algunos países se promueven esquemas

de formadores en emprendimiento (Sanabria-Rangel y col., 2015); en el mismo tenor, Guatemala-Mariano y Echeverría-Fuentes (2022) sugieren que las IES deben vigilar la actualización de los docentes en los conocimientos y enseñanza del emprendimiento.

De igual forma, Monsalve-Serrano (2013) resaltó la experiencia previa y la habilidad en investigación como rasgos importantes del asesor en emprendimiento, por lo que el resultado encontrado en la dimensión investigación es congruente con la literatura referida, puesto que 23 de 34 docentes del ITS El Mante realizaban cotidianamente investigación científica, lo que les permite enfrentar el trabajo de asesoría de una forma más adecuada, basándose en evidencias sólidas comprobadas por la ciencia. A pesar de que un perfil investigador resalta las habilidades multidimensionales de la persona (Castro-Maldonado y col., 2023), no todos los docentes están interesados en realizar actividades emprendedoras, ya que se encontró que el 30.4 % (7) de los que hacían investigación no se involucraban en las actividades emprendedoras, como tampoco el 72.7 % (8) de los que no realizaban investigación (Tabla 4), de los cuales, la mitad (4 de 8) sí conocían sobre temas de emprendimiento (Figura 1).

Las IES deben establecer estrategias que impulsen a los docentes con las características de emprendedores para convertirse en asesores de negocios, por ejemplo implementando planes de desarrollo profesional que fortalezcan su crecimiento académico en innovación y emprendimiento. Guatemala-Mariano y Echeverría-Fuentes (2022: 59) sugieren que los docentes sean apoyados para obtener capacitación profesional y certificaciones en temas necesarios como finanzas para emprendedores, *design thinking* (pensamiento de diseño), y el uso de herramientas como *Lean Canvas*, *Business Model Canvas* y *Lean Startup*, y señalan que la creación de premios podría animarles a asesorar proyectos de emprendimiento; también Sánchez-García y col. (2017) propusieron la formación del profesio-

rado en metodologías de la innovación para una mayor efectividad en su función de asesores.

Una fortaleza del presente trabajo es que el modelo propuesto fue calibrado con el test *Hosmer y Lemeshow* y además no presenta sobresaturación, ya que el número de observaciones por predictor está en el rango sugerido de acuerdo a Núñez y col. (2011) (entre 10 y 15 para la regresión logística), por lo que podría replicarse en una población diferente. Aunque el tamaño muestral utilizado es pequeño, resulta aceptable porque se corresponde con los objetivos de investigación y con el análisis realizado, como afirman Ortega-Calvo y Cayuela-Domínguez (2002), ya que se reportan 19 eventos de interés y 2 variables en el modelo final ajustado ( $19/2 = 9.5$ , que es un valor cercano a las 10 observaciones); sin embargo, queda pendiente la evaluación de la validez externa del modelo con una muestra mayor. También se consideró como limitación la utilización exclusiva de variables categóricas, ya que se ha reportado que producen estimaciones ineficientes y sesgadas.

## CONCLUSIONES

El involucramiento de los docentes en actividades de emprendimiento se pudo prede-

cir a partir de sus conocimientos en el tema y su labor de investigación, toda vez que, en esta investigación, los 19 docentes del ITS El Mante que más participaban en actividades emprendedoras, fueron quienes presentaban una u otra característica; de ellos, 14 docentes tenían un perfil completo de asesores de emprendimientos y 5 solo un perfil parcial. El género, la capacitación y el dominio informático no se encontraron asociados con este involucramiento. Estos resultados sugieren que, las instituciones que deseen formar generaciones con capacidad emprendedora deben favorecer el desarrollo de ambas habilidades en la plantilla docente. Es factible que otros factores también podrían estar relacionados con el perfil buscado, por lo que es conveniente evaluar la validez externa del modelo utilizando otras variables en muestras más grandes para identificar un perfil de asesor en emprendimientos más completo. Este tipo de estudios contribuiría a la generación de conocimiento en el campo del emprendimiento y el análisis del factor humano dentro de las organizaciones.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

## REFERENCIAS

- Ács, Z. J., Szerb, L., Lafuente, E., & Márkus, G. (2020). The Global Entrepreneurship Index 2019. The Global Entrepreneurship and Development Institute.
- Aguirre-González, J. A. (2017). *Emprendeduría práctica para hacer negocios*, Segunda edición. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Almagro-Gavira, L. M. y Manzano-Soto, N. (2017). Fomento y desarrollo del emprendimiento universitario a través del programa CMETT. En AIDIPE (Ed.), *Interdisciplinariedad y Transferencia* (pp. 333-341). Bubok. <https://aidipe2017.aidipe.org>
- Almagro-Gavira, L. M. y Manzano-Soto, N. (2021). Inhibidores para emprender que pueden atenderse desde un enfoque de orientación para la carrera: el caso de los estudiantes emprendedores de la UNED. *Revista de Humanidades*, 42, 257-286. <https://doi.org/10.5944/rdh.42.2021.28796>
- Baca-Urbina, G. (2013). *Evaluación de proyectos*. Séptima edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Barreras-Beltrán, C. y Castillo-Ochoa, E. (2021). Factores Asociados a la Producción Científica de los Académicos de la División de Ciencias Sociales en la Universidad de Sonora. *Revista de Ciencias de la Educación Academicus*, 18, 78-88. [https://ice.uabjo.mx/media/15/2022/02/11\\_Articulo\\_9\\_\(1\).pdf](https://ice.uabjo.mx/media/15/2022/02/11_Articulo_9_(1).pdf)
- Berea-Baltierra, R., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., Palacios-Cruz, L., Moreno, J. y Talavera, J. O. (2014). Del juicio clínico a la regresión logística

- múltiple. *Revista médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 52(2), 192-197. <https://www.medigrap hic.com/pdfs/imss/im-2014/im142r.pdf>
- Bóveda, Q. J. E., Oviedo, A. y Yakusik, S. A. L. (2015). Manual de Emprendedorismo. Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA).
- Cardona-Arbeláez, D., Montenegro-Rada, A. y Hernández-Palma, H. G. (2017). Creación de empresa como pilar para el desarrollo social e integral de la región caribe en Colombia: Apuntes críticos. *Saber, Ciencia y Libertad*, 12(1), 134-143. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2017v12n1.698>
- Castro-Maldonado, J. J., Gómez-Macho, L. K. y Camargo-Casallas, E. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27(75), 140-174. <https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- Chávez-Sáenz, M. y Norzagaray-Gamez, M. A. (2023). 30 años del sistema de Institutos Tecnológicos Descentralizados del TecNM. Tecnológico Nacional de México.
- Cristancho-Triana, G. J., Ninco-Hernández, F. A., Cancino-Gómez, Y. A., Alfonso-Orjuela, L. C. y Ochoa-Daza, P. E. (2021). Aspectos clave del plan de negocios para emprender en el contexto colombiano. *Suma de Negocios*, 12(26), 41-51. <https://doi.org/10.14349/sumneg/2021.V12.N26.A5>
- Dagnino, J. (2014). Riesgo relativo y odds ratio (razón de ventajas). *Revista Chilena de Anestesia*, 43(4), 317-321. <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.10.pdf>
- Guatemala-Mariano, A. y Echeverría-Fuentes, R. de J. (2022). Diagnóstico del Ecosistema de Emprendimiento universitario de Tabasco, México, con Investigación-Acción. En I. C. Esparza-García (Ed.), *Emprendimiento, Innovación y Universidad* (pp. 39-63). Instituto Tecnológico de Sonora.
- Gutiérrez-Rodríguez, J., Ortiz-Riaga, M. C., Rodríguez-Gaitán, S. M. y Suárez-Bocanegra, P. M. (2016). Influencia de la universidad en la creación de empresa. Estudio de casos colombianos. *Revista Boletín REDIPE*, 5(2), 70-78. <https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/35>
- Kappes, M. y Riquelme, V. (2021). El valor p, y medidas de efecto: su interpretación en investigación cuantitativa en enfermería. *Revista Ene de Enfermería*, 15(2). <http://ene-enfermeria.org/ojs/index.php/ENE/article/view/1247>
- Martínez-Garcés, J., Durán-Omaña, S. y Serna-Borja, W. (2021). COVID-19, educación en emprendimiento e intenciones de emprender: Factores decisivos en estudiantes universitarios. *Revista de Ciencias Sociales*, 27(2), 272-283. <https://doi.org/10.31876/rcs.v27i2.35913>
- Monsalve-Serrano, J. E. (2013). Jóvenes, talento y perfil emprendedor. Instituto de la Juventud.
- Muñoz-Martínez, M. y Garay-Garay, F. (2015). La investigación como forma de desarrollo profesional docente: Retos y perspectivas. *Estudios Pedagógicos*, 41(2), 389-399. <https://doi.org/10.4067/S0718-07052015000200023>
- Núñez, E., Steyerberg, E. W. y Núñez, J. (2011). Estrategias para la elaboración de modelos estadísticos de regresión. *Revista Española de Cardiología*, 64(6), 501-507. <https://www.doi:10.1016/j.rece sp.2011.01.019>
- Ochoa-Sangrador, C. (2019). Diseño y análisis en investigación. International Marketing y Communication, S.A.
- Orozco-Triana, J. A., Parra-Bernal, L. D., Ruíz-Arias, C. L. y Matíz-Bulla, F. J. (2016). Acompañamiento a emprendedores en la Universidad EAN: Del modelo IN3 a EAN Impacta –2011-2016. *Revista Escuela Administración y Negocios*, 81, 12-25. <http://dx.doi.org/10.21158/01208160.n81.2016.1553>
- Ortega-Calvo, M. y Cayuela-Domínguez, A. (2002). Regresión logística no condicionada y tamaño de muestra: una revisión bibliográfica. *Revista Española de Salud Pública*, 76, 85-93. [https://www.sanidad.gob.es/biblioPublic/publicaciones/recursos\\_propios/resp/revista\\_cdrom/vol76/vol76\\_2/RS762C\\_85.pdf](https://www.sanidad.gob.es/biblioPublic/publicaciones/recursos_propios/resp/revista_cdrom/vol76/vol76_2/RS762C_85.pdf)
- Ortega-Páez, E., Ochoa-Sangrador, C. y Molina-Arias, M. (2022). Regresión logística binaria simple. *Evidencias en Pediatría*, 18(11). <http://www.evidenciasenpediatria.es/EnlaceArticulo?ref=2022;18:11>
- Pertuz-Peralta, V. P., Navarro-Rodríguez, A., Rojas-Caicedo, G. Y. y Quintero, L. T. (2016). Perfil docente y fomento de la cultura del emprendimiento: búsqueda de una relación. *Educación y Educadores*, 19(1), 29-45. <https://educacionyeducadores.unisabana.edu.co/index.php/eye/article/view/5225>
- Quiñones-Herrera, M. y Díaz-Pérez, F. (2021). El trabajo emocional en la asesoría de negocios a emprendimientos y microempresas chilenas. *Interdisciplinaria*, 38(3), 287-302. <https://doi.org/10.16888/interd.2021.38.3.17>
- Rojas, G. Y., Pertuz, V., Navarro, A. y Quintero, L.

T. (2019). Instrumento para Identificar Características Personales y Didáctica Utilizadas por los Docentes en la Formación de Emprendedores. *Formación Universitaria*, 12(2), 29-40. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062019000200029>

Saldarriaga-Salazar, M. E. y Guzmán-González, M. F. (2018). Enseñanza del emprendimiento en la educación superior: ¿Metodología o modelo? *Revista Escuela de Administración y Negocios*, 85, 125-142. <https://doi.org/10.21158/01208160.n85.2018.2054>

Sanabria-Rangel, P. E., Morales-Rubiano, M. E. y Ortiz-Riaga, C. (2015). Interacción universidad y entorno: marco para el emprendimiento. *Educación y Educadores*, 18(1), 111-134. <https://doi.org/10.5294/edu.2015.18.1.7>

Sánchez-García, J. C., Ward, A., Hernández, B. y Florez, J. L. (2017). Educación emprendedora: Estado del arte. *Propósitos y Representaciones*, 5(2), 401-473. <https://doi.org/10.20511/pyr2017.v5n2.190>

Sarabia-Huerta, A. I. y Delhumeau-Rivera, S. (2019). Aproximación al concepto de ecosistema de emprendimiento. *Ciencia Administrativa*, 2, 1-7. <https://www.uv.mx/iesca/files/2020/02/01CA201902.pdf>

Trujillo, P. (2019). ¿Vives en una región que estimula y potencia tu talento creativo? En C. U. Alain-Servais (Ed.), *Ecosistemas Creativos* (Segunda edición, pp. 27-36). Conexiones Creativas.



Imágenes tomada de: Canva educativo

# Conductas de riesgo y conocimiento de componentes del automóvil asociados a los accidentes de tránsito en universitarios del sur de Tamaulipas

## Risk behaviors and knowledge of automobile components associated with traffic accidents in workers and university students in southern Tamaulipas

Ennio Héctor Carro-Pérez\*, Arturo Secundino Hernández-Gómez, Oscar Eliezer Mendoza-De Los Santos, Brenda Itzel Herrera-Barajas

### RESUMEN

Los accidentes de tránsito se consideran un problema de salud pública a nivel mundial, por lo que es fundamental identificar variables conductuales consideradas factores predisponentes para este tipo de incidentes. El objetivo de este trabajo fue determinar el conocimiento de los conductores sobre componentes del automóvil y si practicaban las principales conductas de riesgo asociadas a percances automovilísticos. Se realizó una investigación cuantitativa, no experimental y transversal, en una muestra de 200 conductores residentes de los municipios de la zona sur de Tamaulipas, México. Los encuestados mostraron desconocimiento sobre la presión de los neumáticos (27.1 %), el estado de la llanta de refacción (44.2 %), y cómo medir los líquidos del motor del automóvil (18.5 %), existiendo diferencias significativas, con valores más altos de desconocimiento de las mujeres ( $P < 0.01$ ;  $P < 0.05$ ). Respecto a las conductas de riesgo, más del 30 % reportó usar el celular mientras conducía, con una mayor incidencia ( $P < 0.01$ ) en los conductores menores de 30 años. El 8 % mencionó no utilizar el cinturón de seguridad, destacando los hombres en esta conducta insegura. La edad mostró diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) en cuanto a conductas de riesgo asumidas, siendo los conductores menores de 30 años quienes presentaron un perfil de riesgo más acentuado. Los hallazgos indican la existencia de desconocimiento de aspectos importantes del vehículo y la práctica de conductas de riesgo por parte de los habitantes del sur de Tamaulipas, que ponen en riesgo la seguridad y vida de conductores y personas en su entorno, ya sea como peatones o en otros vehículos. Se sugiere promover más la cultura vial, especialmente en los conductores más jóvenes, a través del desarrollo de estrategias de intervención que muestren ser eficientes.

**PALABRAS CLAVE:** conductas de riesgo al conducir, conocimiento del automóvil, accidentes de tránsito, comportamiento vial, psicología del tránsito.

### ABSTRACT

Traffic accidents are considered a public health problem worldwide; therefore, it is essential to identify behavioral variables considered predisposing factors for these types of incidents. The aim of this study was to determine drivers' knowledge of car components and whether they practiced the main risk behaviors associated with car accidents. A quantitative, non-experimental, cross-sectional investigation was carried out on a sample of 200 drivers residing in the municipalities of the southern zone of Tamaulipas, Mexico. Respondents showed a lack of knowledge regarding tire pressure (27.1 %), the condition of the spare tire (44.2 %), and how to measure the car's engine fluids (18.5 %), with significant differences, with higher values of ignorance among women ( $P < 0.01$ ;  $P < 0.05$ ). Regarding risky behaviors, more than 30 % reported using the cell phone while driving, with a significant difference ( $P < 0.01$ ) in the drivers under 30 years of age. Additionally, 8 % mentioned not using seat belts, with men standing out in this unsafe behavior. Age showed a significant difference ( $P < 0.05$ ) in terms of risk-taking behaviors, with drivers under 30 years of age presenting a more accentuated risk profile. The findings indicate the existence of ignorance of essential aspects of vehicles and the practice of risky behaviors by the inhabitants of southern Tamaulipas, who put at risk the safety and lives of drivers and people in their environment, either as pedestrians or in other vehicles. It is suggested that more road safety culture be promoted, especially among younger drivers, through the development of intervention strategies that prove to be efficient.

**KEYWORDS:** risky driving behaviors, car knowledge, traffic accidents, road behavior, traffic psychology.

\*Correspondencia: [ennio\\_carro@yahoo.com](mailto:ennio_carro@yahoo.com)/Fecha de recepción: 5 de julio de 2024/Fecha de aceptación: 27 de enero de 2025/Fecha de publicación: 31 de enero de 2025.

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Derecho y Ciencias Sociales, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico Aplicado al Comportamiento (CIDETAC), Centro Universitario Tampico-Madero s/n, Tampico, Tamaulipas, México, C. P. 89109.

## INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) considera los accidentes automovilísticos como un problema de salud pública que debe ser atendido con urgencia, ya que prevé que para 2030 serán la causa de aproximadamente 13 millones de muertes alrededor del mundo. Este panorama no es nuevo, desde el 2011, los accidentes de tránsito han tenido especial relevancia en el escenario de la salud pública a nivel mundial, de tal manera que, desde dicho año, la OMS (2011) estableció la declaratoria para el decenio de seguridad vial entre 2011 y 2020, considerando las cifras de muertes en poblaciones menores a 29 años de edad, en las que los accidentes de tránsito se encontraban entre las cinco primeras causas. Los datos actuales no son alentadores respecto a los del 2011, estos indican que los traumatismos debido al tránsito son la principal causa de muerte entre niños y jóvenes de 5 a 29 años de edad, de acuerdo a la OMS (WHO, por sus siglas en inglés: World Health Organization) (WHO, 2023).

En México, los datos no describen una realidad diferente. Durante 2019, en zonas urbanas y suburbanas hubo un total de 362 729 siniestros de tránsito; en 2020, 301 678; en 2021, 340 415; en 2022, se registraron 377 231 siniestros de tránsito, en los cuales, 5 181 personas fallecieron y 91 501 resultaron heridas; para 2023, la cifra aumentó a 381 048 siniestros, en los cuales fallecieron 4 803 personas y 90 500 resultaron heridas, de acuerdo con la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023; 2024).

La conducta de las personas al conducir es una de las principales causas de accidentes vehiculares, sin embargo, se ha señalado que las condiciones técnicas de los vehículos también están muy relacionadas con las tasas de mortalidad en accidentes de tráfico (Alonso y col., 2021). La evidencia sugiere tendencias claras en las conductas de riesgo al conducir un automóvil. Así, por ejemplo, estudios en otros contextos nacionales aluden que la edad y el sexo son variables relacionadas a las con-

ductas de riesgo, siendo los hombres jóvenes los más propensos a asumir este tipo de conductas al conducir y a mostrarse menos preocupados por sufrir accidentes de tráfico (Cordellieri y col., 2016; Ventsislavova y col., 2021; Zeyin y col., 2022).

Por su parte, Yan y col. (2022) encontraron que los conductores jóvenes son más propensos a distraerse mientras usan el celular (especialmente durante la noche) que otros conductores, resultando particularmente relevante que, en comparación con conductores experimentados, los novatos conducen más rápido mientras hablan por teléfono. Por otro lado, el uso inadecuado del cinturón de seguridad ha sido señalado como una de las conductas de riesgo que más impacto tiene en la severidad de los accidentes automovilísticos (Febres y col., 2020), su relación con las variables como la edad y otras conductas de riesgo (por ejemplo, conducir bajo el influjo de sustancias) ha sido evidenciada en diversos estudios (Malekpour y col., 2021; Topal y col., 2024).

Para el caso de México, es posible afirmar que las intervenciones dirigidas a prevenir lesiones por accidentes de tráfico no han surtido el efecto deseado, además de que estas tienden a concentrarse en vehículos de cuatro ruedas, dejando de lado a otros usuarios vulnerables, como son los motociclistas, aspecto de suma relevancia, particularmente dado el creciente número de lesiones en estos conductores (Pérez y col., 2021; Cardona, 2023), los cuales pasaron de tener 9 701 percances viales en 2019, a 79 283 para 2023, lo que representa un incremento de 8.2 percances por cada uno que había en 2019 (INEGI, 2023).

En la actualidad se busca comprender la seguridad vial y los accidentes de tráfico desde perspectivas amplias que tomen en consideración distintas variables, tales como factores del vehículo y dispositivos de protección, el diseño vial, la infraestructura (v. g. pasos peatonales) y el control de tráfico, los cuidados hospitalarios (post-accidente), los marcos

legales e institucionales, así como el factor humano (Patarroyo y Casanova, 2021; Andrade y Chaparro, 2022; Chacón, 2022; Rodríguez y Urrego, 2023; Goel y col., 2024; González y Vargas, 2024). En este sentido, la psicología del tráfico ha realizado contribuciones importantes, tanto a un nivel conceptual como metodológico, en el estudio de variables psicológicas de los conductores, que incluyen sus pautas afectivas, sus niveles de estrés, motivación, personalidad, autoestima y conducta al conducir (Porter, 2011; Sedano y Dorantes, 2020; Narváez y col., 2022; Hidalgo, 2023), siendo este último uno de los factores de mayor importancia en la explicación de los accidentes automovilísticos (Chand y col., 2021; Abdullah y Sipos, 2022). Pero, el conocimiento que los conductores tienen sobre las condiciones de su vehículo ha sido un aspecto escasamente explorado en comparación con otros factores de riesgo automovilístico, lo que hace interesante su estudio.

En el *Plan mundial para el Decenio de acción para la seguridad vial 2021-2030* de la OMS, se incluyen los ejes “vehículos seguros” (asociado con el buen uso y mantenimiento de los componentes del automóvil) y “uso seguro de la infraestructura vial” por parte de los usuarios (relacionado con las conductas que se desarrollan durante la conducción), debido al impacto que tienen ambos en los accidentes automovilísticos (OMS, 2021).

El objetivo de este trabajo fue determinar el conocimiento de los conductores sobre los componentes del automóvil que afectan su buen funcionamiento, así como las principales conductas de riesgo que asumen.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño de investigación

Se realizó una investigación cuantitativa, con un diseño no experimental, de tipo transversal correlacional, considerando que solo existió un momento de medición. Este tipo de diseño es apropiado para las variables que regularmente se observan *in situ* o sin intervención por parte de los investigadores. En el presente es-

tudio, no se persiguió manipular ninguna condición para la emisión deliberada de un comportamiento, sino que, mediante el autorreporte, se buscó estimar el conocimiento de los automovilistas sobre sus vehículos y la ocurrencia de las conductas de riesgo al conducir.

### Muestra

Considerando que todo conductor, independientemente de sus características debe reconocer las mismas reglas de tránsito y aspectos de seguridad vial, se observó una muestra no probabilística de 200 participantes voluntarios, de los dos sexos (Hombres: 58.5 %, Mujeres: 41.5 %), con una edad promedio de 39.2 años (DE = 15.8), y mediana de 39 años, matriculados en alguna de las licenciaturas o empleados de la Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT), Centro Universitario Sur (CUS), ubicado en el municipio de Tampico, Tamaulipas, México. El 66.1 % (n = 121) contó con estudios universitarios, el 10.4 % (n = 19) de bachillerato, el resto educación básica. La muestra observada tuvo en promedio 17.6 años (DE = 14) y una mediana de 15 años de conducir habitualmente, con una media de 1.68 accidentes en el tiempo de conducir (Mdn = 1, DE = 2.08).

Los criterios de inclusión de la muestra fueron la conducción habitual de un automóvil o vehículo (4 d a 5 d a la semana), tiempo de conducción ( $\geq 1$  año), con automóvil al momento del levantamiento de datos, pertenecer a la UAT, residir en el área conurbada del sur de Tamaulipas (que incluye los municipios de Tampico, Madero y Altamira) de manera permanente, no transitoria, ambos sexos. La exclusión se daba por no poseer alguno de los anteriores criterios propuestos para la inclusión.

El tamaño de la muestra fue determinado por la accesibilidad y la condición de “voluntario” de las unidades de análisis. Se estimó una muestra de 289 automovilistas, con un 50 % de probabilidad de éxito, 5 % de error, y un valor t de 1.96, a partir de una población promedio de 1 161 automóviles, determinada a partir de conteos efectuados durante una se-

mana de ciclo académico activo o clases, en los distintos estacionamientos de las facultades que integran el CUS. Sin embargo, los criterios de inclusión, el rechazo a participar en el estudio, y la interrupción de los periodos de levantamiento por la terminación de periodos escolares y suspensión de labores administrativas, dificultó contar con escenarios de levantamiento constantes que imposibilitó obtener la muestra requerida en el tiempo establecido para el levantamiento de datos.

### Instrumentos

Se utilizaron tres instrumentos de tipo autorreporte desarrollados para este estudio:

Ficha de datos sociodemográficos y consentimiento informado. Integrado por el consentimiento informado del conductor o automovilista a participar en el levantamiento de datos, y ficha integrada por 5 ítems abiertos y cerrados relativos al sexo, edad, ocupación en la UAT, años de conducción y accidentes experimentados del automovilista.

Cuestionario de Conocimientos sobre el Estado del Automóvil (CCEA). Integrado por 12 ítems abiertos y cerrados con respuesta dicotómica (sí – no) salvo dos referentes al lugar de la revisión o verificación de los componentes del automóvil con seis opciones de respuesta (gasolinera, vulcanizadora, agencia, taller, residencia o vivienda, otros). Los ítems exploran el conocimiento que tiene el conductor del estado óptimo de los componentes de rodamiento (neumáticos) y líquidos del motor de su automóvil. Se consideraron aquellos relacionados con el buen funcionamiento del automóvil en movimiento, y que pueden ser revisados por el conductor, sin necesidad de un instrumental complejo o en un espacio especializado. Así, se evaluó el conocimiento del conductor respecto a la presión de los neumáticos (PN) (abierto); el estado de la llanta de refacción (SRef) (cerrado); conocimiento de los líquidos de frenos, del motor o líquidos del automóvil (LA) (abierto); y medición de los líquidos (ML) (cerrado), así mismo, donde se realiza la verificación de PN y ML (cerrados),

quién las lleva a cabo (abiertos) e intervalo de revisión de PN y ML (abiertos). Para los ítems no textuales, en formato escalar, relativos a la PN, o intervalo temporal de cada revisión, la confiabilidad fue aceptable ( $\alpha = 0.605$ ,  $\omega = 0.714$ ), particularmente con la omega de McDonald de índices superiores a 0.65 (Ventura-León y Caycho-Rodríguez, 2017).

Autorreporte de conductas de riesgo (ACR). Integrado por 12 ítems agrupados en dos apartados, relacionados con la ejecución de conductas de riesgo mientras se conduce el automóvil, y la estimación de velocidad de conducción en kilómetros sobre hora en distintos tipos de vía urbana. En particular se evalúa de manera dicotómica (sí – no), el reporte o estimación que proporciona el conductor sobre el uso de cinturón de seguridad (CS), la conducción con dos manos al volante (MV), el uso de celular mientras se conduce (UC), uso de direccionales al cambiar de carril o trayectoria (DCC), y el empleo de intermitentes al detener el vehículo en la vialidad (IP), cuando se sufre alguna avería (IAv), o se reduce la velocidad por algún percance o bloqueo en la vialidad (IAcc), factores asociados a los accidentes de tránsito (OMS, 2021; OPS, 2023; WHO, 2023); además, se exploró la velocidad estimada por el conductor en las diferentes vías que señala el Reglamento de Tránsito del Estado de Tamaulipas (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2010). Para los ítems no textuales, en formato escalar, relativos a la estimación de la velocidad en vías o vialidades primarias, secundarias, zonas residenciales, escolares y hospitalarias, la confiabilidad fue aceptable ( $\alpha = 0.744$ ,  $\omega = 0.772$ ), considerando el criterio que establece Ventura-León y Caycho-Rodríguez (2017).

Todos los ítems del CCEA y del ACR fueron evaluados por 6 jueces investigadores y docentes universitarios, 5 de ellos miembros del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) de México. Para la evaluación se siguieron las recomendaciones establecidas por Osterlind (Chacón-MoscOSO y col., 2019), de valorar cada uno de los ítems o pre-

guntas en tres dimensiones o aspectos y seleccionar aquellos con puntajes iguales o superiores a 0.5 en todas las dimensiones, si es empleada una escala de - 1 a 1. Se consideraron las dimensiones utilidad (U) de la pregunta para medir o evaluar el aspecto de interés; factibilidad (F) del ítem o la posibilidad de obtener mediante la pregunta la información deseada; y claridad (C) con la que se encontraba redactada la pregunta o ítem. Cada una de las dimensiones se evaluó mediante una escala de tres puntos (1 = nada: U, F o C; 2 = medianamente: U, F o C; 3 = muy: U, F o C), por lo que en vez del 0.5, se consideró el valor criterio de 2.5 para elegir los ítems. Todas las preguntas que integraron el CCEA y ACR obtuvieron, por parte de los jueces, puntuaciones promedio iguales o superiores a 2.5 en U, F y C, por lo que se consideraron apropiados para su evaluación.

### Procedimiento

Los cuestionarios fueron aplicados por tres entrevistadoras, egresadas de la licenciatura en psicología, en los estacionamientos del CUS. Se abordaba a los conductores de vehículos que recién llegaban o estaban por retirarse, y se les solicitaba su participación voluntaria en el estudio. Después de indicarles el propósito del estudio y leerles el consentimiento informado, mediante autorización, se procedía a la aplicación de los instrumentos. Antes de la aplicación, para determinar la confiabilidad del levantamiento por parte de las entrevistadoras, se diseñó una prueba consistente en la aplicación de 13 ítems de los instrumentos utilizados, particularmente de la Escala de Percepción del Riesgo al conducir (EPR), de la cual no se reportan resultados en este trabajo. Los ítems fueron integrados en un formato de aplicación con instrucciones, se administraron a una muestra de 7 profesores de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales (FADYCS) del CUS, en dos momentos diferentes con un intervalo de 15 d de diferencia. A cada profesor se le administró el mismo formato de aplicación en los dos momentos, pero por un entrevistador diferente. De tal manera, se consideró que los profesores

deberían tener resultados similares independientemente del entrevistador, lo anterior sería evidencia de que el entrevistador no afecta las aplicaciones, lo que sería un indicador de consistencia de la aplicación. La comparación de los resultados obtenidos en los dos momentos de aplicación se realizó a través de la *t* de Student para muestras independientes. Los valores de *P* para cada ítem fueron superiores al 0.05, con lo que se confirmó lo esperado en términos de confiabilidad. Esta prueba también se consideró como evidencia de estabilidad de los ítems empleados para la medición.

Los instrumentos fueron desarrollados a partir de las dimensiones o factores generales que intervienen en el comportamiento vial o del individuo usuario de automóviles y vialidades, referidas por la OMS (2021) y la OPS (2023): a) El vehículo y sus componentes; b) La infraestructura o vialidades; c) El conductor del vehículo o usuario de las vialidades. En cada una de estas tres dimensiones existen conductas adecuadas-seguras e inadecuadas-inseguras, de tal manera, que el CCEA se desarrolló para evaluar la primera dimensión y el ACR al conductor.

### Consideraciones éticas

De acuerdo al tipo de investigación, se consideró la recomendación del consentimiento informado como parte del protocolo del levantamiento de datos, la cual está contenida en la Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial (AMM, 2024). Por lo que todos los participantes fueron informados del propósito del estudio, y estuvieron de acuerdo con este, consintiendo por escrito responder cada uno de los instrumentos empleados y en su inclusión en el levantamiento de datos.

### Análisis de datos

Los datos recopilados se analizaron mediante estadística descriptiva (medidas de tendencia central y dispersión), e inferencial no paramétrica (la *U* de Mann-Whitney, considerando el tipo de muestra y la anormalidad de los datos probada mediante Kolmogorov-Smirnov:

K-S), para determinar diferencias en la velocidad de conducción tanto entre sexos como entre grupos de edad; también se empleó la prueba  $\chi^2$  para comparar las conductas de riesgo entre sexos y grupos de edad. Los datos fueron analizados mediante el programa de análisis estadístico de acceso libre Jamovi, 2021, versión 2.2.5.

## RESULTADOS

### Conocimiento del estado del automóvil

El 27.1 % de los automovilistas entrevistados

desconocía que deben revisar la PN de los vehículos, mientras que el 44.2 % no sabía si contaban con llanta de refacción, ni el 5 % tenía conocimiento respecto a los LA que deben verificar, y 18.5 % ignoraba cómo hacer la ML (Tabla 1).

Con relación al lugar dónde realizaban la verificación de los componentes vehiculares, en el caso de la PN, el 33.3 % lo efectuaba en los expendios de combustible o gasolineras, el 24.2 % en vulcanizadoras o talleres de repa-

■ **Tabla 1. Porcentaje de conocimiento de condiciones del vehículo y verificación de los neumáticos y líquidos del automóvil, por sexo y grupo de edad.**

Table 1. Percentage of knowledge of car condition, and verification of tire and car fluid by sex and age groups.

	Total (%)	Sexo			Edad		
		Mujeres (%)	Hombres (%)	P (sexo)	< 30 (%)	≥ 30 (%)	P (edad)
<b>Conocimiento</b>							
Presión de neumáticos (PN)	72.9	59.8	82.1	**	61.6	79.2	*
Llanta de refacción (SRef)	55.8	49.4	60.3	*	45.2	61.6	*
Líquidos del automóvil (LA)	95.0	90.4	98.3	*	91.8	96.8	ns
Medición de los líquidos (ML)	81.5	72.3	88.0	*	72.6	87.3	*
<b>Sitio de verificación de PN</b>							
Expendios o gasolineras	33.3	36.6	31.0	*	34.7	32.8	ns
Vulcanizadoras o talleres	24.2	18.3	28.4				
Residencia	11.6	6.1	15.5				
Diferentes sitios	30.9	39.0	25.1				
<b>Sitio de verificación de ML</b>							
Residencia	54.0	45.1	60.3	ns	57.7	51.6	ns
Agencia automotriz	16.7	19.5	14.7				
Taller mecánico	9.1	9.8	8.6				
Gasolinera	6.6	11.0	3.4				
Otros	13.6	14.6	13.0				
<b>Quién realiza la verificación de PN</b>							
Conductor	17.3	4.9	25.9	**	16.7	17.7	ns
Se delega a otro	82.7	95.1	74.1				
<b>Quién realiza la verificación de ML</b>							
Conductor	54.6	34.6	67.0	**	58.6	51.2	ns
Se delega a otro	46.4	65.4	33.0				

ns = no significativo; \*P < 0.05; \*\*P < 0.01.

ración de neumáticos, el 11.6 % en la residencia del conductor, mientras que, el 30.9 % lo hacía en sitios distintos a los ya mencionados. En cuanto a dónde se llevaba a cabo la revisión de ML, esta se hacía en un 54.0 % en la residencia del conductor, lo que marca una amplia diferencia con respecto al lugar de verificación de la PN (11.6 %); el resto de las respuestas (46 %) se distribuyó entre diferentes establecimientos especializados, como agencias automotrices, talleres mecánicos o que efectúan la revisión de manera complementaria, ya sea en las gasolineras u otros sitios. La verificación de ML fue realizada en un 54.6 % por parte del conductor, sin embargo, la revisión de la PN era delegada mayormente a terceros (82.7 %).

Los días o temporalidad en la que realizaba la revisión varió según lo que se verificara, así, la PN se revisaba cada 44.9 d en promedio (Mdn = 30.0, DE = 58.0), mientras que la ML presentaron un intervalo de revisión promedio de 69.3 d o cada 2 meses (Mdn = 30, DE = 82.6). La amplia dispersión de PN se explica debido a que algunos participantes verificaban la presión una vez al año, mientras otros lo hacían a diario. De la misma manera, la mediana y desviación estándar de ML, sugiere valores extremos muy pronunciados respecto a la media, debido a que hay participantes que verificaban al año la ML y otros a diario (Tabla 2).

Las mujeres presentaron un mayor promedio que los hombres tanto en la regularidad de revisión de la PN (Med = 46.9, Mdn = 30, DE = 66.2), como en la revisión de ML (Med = 77.0, Mdn = 30.0, DE = 86.0) (Tabla 3).

### Conductas de riesgo

La conducta de riesgo que sobresalió fue la de una sola MV con un total de 44.5 %, presentándose mayormente en los hombres (55.6 %) y en las personas < 30 años (67.1 %). Mientras que la segunda fue la del UC mientras conduce, correspondiendo al 32 % de la población estudiada, quien por sexo obtuvo un porcentaje similar al total de la muestra; y

■ **Tabla 2.** Regularidad con la que se revisan neumáticos y la medición de líquidos del automóvil.

Table 2. Regularity with which tires are checked and measurement of car fluids are checked.

Parámetro	Total		
	Mdn	Med	DE
<b>Revisión de PN (días)</b>			
Regularidad	30.0	44.9	58.0
<b>Revisión de ML (días)</b>			
Regularidad	30	69.3	82.6

por edad, se manifestó mayormente en los < 30 años (47.9 %).

Respecto al CS, un 8 % reportó no utilizarlo, siendo los hombres quienes menos asumen esta medida de seguridad; mientras que por edad, se presentaron cifras similares en ambos grupos. Dicha conducta asumida fue superior al 90 % entre sexos y grupos de edad.

En el uso de DCC, IP, IAv e IAcc, los datos indicaron incidencias superiores al 90 %, por lo que estas conductas asociadas a prevenir que exista un percance por los laterales del vehículo o por la parte trasera del mismo, se asumieron mejor por parte de la población participante (Tabla 4).

En cuanto a las velocidades en diferentes tipos de vialidades, las mujeres participantes revelaron velocidades medias en las vías primarias de 64.28 km/h, en vías secundarias 47.59 km/h, en zonas residenciales 32.99 km/h y en vialidades que pasan por escuelas y hospitales 27.44 km/h, todas ellas superiores a las permitidas en los artículos 120 y 121 del reglamento de tránsito (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2010). En el caso de los hombres su velocidad promedio reportada fue aún mayor, a excepción de la última (Tabla 5).

Respecto a la distancia de seguimiento, los valores fueron menores a los sugeridos por seguridad en el artículo 73 de la reglamen-

■ **Tabla 3. Regularidad con la que se revisan neumáticos y la medición de líquidos del automóvil en hombres y mujeres.**

Table 3. Regularity with which tires are checked and measurement of car fluids are checked by men and women.

Parámetro	Mujeres			Hombres			P (sexo)		
	Mdn	Med	DE	Mdn	Med	DE	U	F	K-S
<b>Revisión de PN (días)</b>									
Regularidad	30.0	46.9	66.2	30.0	43.5	51.9	ns	ns	**
<b>Revisión de ML (días)</b>									
Regularidad	30.0	77.0	86.0	30.0	64.0	80.2	ns	ns	**

ns = no significativo; \*P < 0.05; \*\*P < 0.01.

■ **Tabla 4. Porcentaje de ocurrencia de conductas de riesgo en hombres y mujeres.**

Table 4. Percentage of occurrence of risk behaviors in men and women.

Conducta de riesgo	Total (%)	Sexo			Edad		
		Mujeres (%)	Hombres (%)	P (sexo)	< 30 (%)	≥ 30 (%)	P (edad)
CS	92.0	96.4	88.9	ns	93.2	91.3	ns
MV	55.5	71.1	44.4	**	32.9	69.0	**
UC	32.0	30.1	33.3	ns	47.9	22.2	**
DCC	97.5	98.8	96.6	ns	95.9	98.4	ns
IP	96.5	96.4	96.6	ns	94.5	97.6	ns
IAv	99.0	97.6	100	ns	98.6	99.2	ns
IAcc	95.0	92.8	97.4	ns	90.4	98.4	*

ns = no significativo; \*P < 0.05; \*\*P < 0.01.

■ **Tabla 5. Velocidades por tipo de vialidad en hombres y mujeres.**

Table 5. Speeds by type of roadway in men and women.

Parámetro	Mujeres			Hombres			P (sexo)		
	Mdn	Med	DE	Mdn	Med	DE	U	F	K-S
<b>Velocidad (km/h)</b>									
Vías primarias	60.00	64.28	17.11	70.00	67.74	20.52	ns	ns	***
Vías secundarias	45.00	47.59	13.93	50.00	50.38	14.87	ns	ns	***
Zonas residenciales	37.50	32.99	11.62	30.00	34.49	13.05	ns	ns	***
Escuelas y hospitales	25.00	27.44	11.47	20.00	27.14	12.20	ns	ns	***
<b>Distancia (m)</b>									
De seguimiento	2.00	4.35	6.42	4.50	5.58	9.60	***	ns	***

U: U de Mann-Whitney; F: Prueba de Levene; K-S: Kolmogorov-Smirnov.

ns = no significativo; \*\*\*P < 0.001.

tación de Tamaulipas (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2010) siendo los hombres quienes reportaron una distancia promedio mayor (5.58 m), que las mujeres (4.35 m).

En cuanto a la edad (Tabla 6), fueron los conductores < 30 años, quienes presentaron mayor velocidad en promedio en las diferentes vialidades, a excepción de zonas residenciales. Mientras que en la distancia de seguimiento, también fueron ellos, quienes presentaron en promedio menor distancia (3.88 m).

## DISCUSIÓN

### Componentes del automóvil

Los líquidos del motor y los neumáticos están asociados al funcionamiento del automóvil, y su descuido, asociado a la falta de revisión y mantenimiento, se considera como parte de las causas de accidentes viales. A nivel nacional, el descuido de estos dos elementos se ha vinculado con el 1.04 % de los accidentes viales en 2020, 1.03 % en 2021, 1.04 % en 2022 y 1.06 % en 2023; para tener una idea de la magnitud de la situación, en este último año, el global de accidentes reportados fue de 4 047 (INEGI, 2024). En Tamaulipas, la tasa de siniestros automovilísticos asociados a estas mismas causas se

encuentra por encima de la media nacional, así, durante el 2020 fue de 1.66 % del total de accidentes ocurridos en la entidad, en el 2021 de 1.29 %, el 2022 de 1.04 %, y el 2023 de 1.16 % (INEGI, 2024).

Si bien, las cifras indican que el conductor es la principal causa de accidentes viales en el país (96.3 %), el mal funcionamiento o falla del automóvil no debe dejarse de lado, principalmente los LA y PN (INEGI, 2024). Existieron diferencias significativas ( $P < 0.01$ ;  $P < 0.05$ ) en cuanto al conocimiento de acuerdo con el sexo de los participantes, siendo más alto el porcentaje de hombres que estuvieron familiarizados con esa información (Tabla 1). De manera similar, los entrevistados  $\geq 30$  años fueron quienes reportaron saber más al respecto ( $P < 0.05$ ) exceptuando el conocimiento de LA que no mostró diferencia estadística ( $P > 0.05$ ).

Los hallazgos también sugieren que hay una asociación significativa entre el sexo de los encuestados y el sitio de verificación de la PN ( $P < 0.05$ ), así como entre el sexo y quien realiza la verificación tanto de PN ( $P < 0.01$ ) como de ML ( $P < 0.01$ ), delegando más las mujeres a otras personas para que realicen

■ **Tabla 6. Velocidad en distintas vías y distancia de seguimiento por grupos etarios.**

Table 6. Speed by type of roadway and following distance by age groups.

Parámetro	< 30 años			≥ 30 años			P (edad)		
	Mdn	Med	DE	Mdn	Med	DE	U	F	K-S
<b>Velocidad (km/h)</b>									
Vías primarias	70.00	70.96	17.57	60.00	63.57	19.70	**	ns	**
Vías secundarias	50.00	49.59	12.90	50.00	49.17	15.40	ns	ns	***
Zonas residenciales	30.00	32.26	11.34	40.00	34.96	13.00	ns	ns	***
Escuelas y hospitales	30.00	27.95	11.63	20.00	27.00	12.00	ns	ns	***
<b>Distancia (m)</b>									
De seguimiento	2.00	3.88	3.47	4.00	5.78	10.30	*	ns	***

U: U de Mann-Whitney; F: Prueba de Levene; K-S: Kolmogorov-Smirnov.

ns = no significativo; \* $P < 0.05$ ; \*\* $P < 0.01$ ; \*\*\* $P < 0.001$ .

ambas actividades. En la edad no se reportó diferencia significativa ( $P > 0.05$ ) en los dos sitios de verificación y quien realiza ambas actividades. Tampoco se presentaron diferencias estadísticas ( $P > 0.05$ ) entre sexos respecto a la regularidad de revisión de la PN y ML, donde las mujeres tuvieron un promedio más alto (Tabla 3).

Dichos resultados sugieren que las campañas de capacitación y concientización sobre la seguridad vial deben diseñarse con un enfoque prioritario (no exclusivo) en los jóvenes y particularmente en las mujeres. Además, conviene subrayar, estos hallazgos abonan al escaso cuerpo de evidencia sobre el conocimiento de los componentes y condiciones del automóvil, y su relación con variables como el sexo y la edad de los automovilistas. Lo anterior, compromete el enfoque “cero accidentes de tránsito” planteados por la OMS y la meta de reducir al 50 % los accidentes a nivel mundial para el 2030, lo que solo se puede lograr con vehículos seguros, además de una mejor infraestructura vial, acompañada de su uso seguro, así como el avance en transportes multimodales y el mejoramiento de la respuesta a los accidentes, ejes importantes de la visión integrada de seguridad vial de la organización (OMS, 2021). Por lo que, se requiere fomentar una cultura vial en la importancia de revisión y verificación de la PN y líquidos del automóvil, ya que las condiciones técnicas de los vehículos se asocian con las tasas de mortalidad en accidentes de tráfico (Alonso y col., 2021).

### Conductas de riesgo

La mayoría de los porcentajes reportados de conductas de riesgo en el presente trabajo son parecidos a los obtenidos en 2016, mediante observación directa, por Carro-Pérez y Ampudia-Rueda (2019), en una muestra de automovilistas en Tampico, Tamaulipas, México. Sin embargo, es de interés observar el porcentaje correspondiente a UC en este estudio (32 %), 6 veces más al encontrado en 2016, donde solo se usó en un 5.2 %. Aunque no hubo

diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre sexo, si se presentó en la edad, destacando el UC en los  $< 30$  años ( $P < 0.01$ ) con un 47.9 %, cifra muy alta en esa población. Además, un 67.1 % de los jóvenes, conducía con una sola MV, reportándose diferencia significativa ( $P < 0.01$ ) entre grupos de edad. Al respecto, Yan y col. (2022) reportaron en su estudio, que los conductores jóvenes son más propensos a distraerse mientras usan el celular, en comparación con conductores experimentados, agravando aún más que los noveles conducen más rápido mientras hablan por teléfono. Los conductores que usan el teléfono mientras conducen tienen cuatro veces más probabilidades de involucrarse en un percance vehicular, que los que no lo hacen, pues su reacción es más lenta por la distracción, y tienden a invadir carril y a no guardar las debidas distancias entre los vehículos (OMS, 2018).

El exceso de velocidad al conducir es un factor asociado con frecuencia tanto al aumento en el riesgo de sufrir accidentes de tránsito como al daño provocado por estos (European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport, 2020). Al respecto, la OMS (2018), reveló que existe una relación directa entre el aumento de la velocidad media y la probabilidad de que ocurra una colisión, así como con la gravedad de sus consecuencias. El riesgo de la velocidad se suele incrementar con el riesgo de otros factores como el UC o conducir después de ingerir alcohol, lo que implica, de acuerdo con la OMS, uno de los mayores retos en seguridad vial, considerando que es el factor asociado a los conductores con mayor presencia en accidentes, estimándose que se exceden los límites de velocidad entre un 50 % a 66 % de las ocasiones que se conducen en el mundo (WHO, 2023).

Las demás conductas de riesgo (CS, DCC, IP e IAv), no reportaron diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre sexo y grupo de edad, a excepción de IAcc en edad ( $P < 0.05$ ), donde los  $\geq 30$  años fueron más precavidos.

Los participantes del estudio reportaron exceder los límites de velocidad permitidos en diferentes tipos de vialidades y de distancia de seguimiento (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2010). Únicamente en la distancia de seguimiento se encontró diferencia significativa ( $P < 0.01$ ) según el sexo, en donde los hombres reportaron una distancia promedio mayor. Estas conductas de riesgo hacen necesario que cualquier legislación en el tema debe tener restricciones en la velocidad iguales o menores a los 50 km/h, para áreas urbanas (WHO, 2023).

Por grupo de edad (Tabla 6), se observó diferencia significativa con una mejor conducta de parte de los  $\geq 30$  años ( $P < 0.01$ ) en vías primarias, así como en la distancia de seguimiento ( $P < 0.05$ ).

Todas las conductas de riesgo analizadas en el presente estudio, independientemente de su ocurrencia en la muestra deben ser consideradas en proyectos o estrategias de intervención de acuerdo con el enfoque “cero accidentes de tránsito” planteado por organismos como la OMS (2021) y OPS (2023).

El sexo y la edad son relevantes si se desea clasificar a los conductores, así, según datos obtenidos en esta investigación, los hombres y personas  $< 30$  años de edad tienen mayor riesgo que conductores con diferentes características, lo cual coincide con lo observado por Cordellieri y col. (2016), Ventsislavova y col. (2021), Zeyin y col. (2022). Respecto a esto, la Secretaría de Salud, a través del Secretariado Técnico del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (STCONAPRA, 2024), resalta que en el 2021 el 42.8 % de las defunciones por accidentes de tránsito se concentraron en los adultos jóvenes, siguiendo las personas de 40 o más años (25 %) y las adultas mayores (16 %). Así también, Malekpour y col. (2021), Topal y col. (2024), evidenciaron en sus investigaciones, que la edad está relacionada con el uso inadecuado del CS y otras conductas de riesgo.

La principal fuente de limitaciones de este estudio fue el tamaño de la muestra y la selección no aleatoria mediante sujetos voluntarios, sin embargo, por la naturaleza de la muestra, consistente en individuos con experiencia al conducir de un año o más, conducción de 4 d o más días a la semana, con automóvil al momento del levantamiento de datos y pertenecientes al marco poblacional seleccionado, se consideró apropiada para extraer conclusiones mediante análisis no paramétricos; además, el estudio provee evidencia que se acumula a la recolectada desde el año 2018 en la región (Carro-Pérez y Ampudia-Rueda, 2019). Así, la duración del levantamiento de datos y las limitaciones ya señaladas deberán ser solventadas en estudios futuros, pero, aun con ello, los resultados indican, al menos descriptivamente, que el perfil de riesgo de los conductores de la región observada no ha cambiado sustancialmente, lo que implica un desafío a las autoridades, instituciones de salud locales y universidades, en el desarrollo de estrategias de intervención en seguridad vial, las cuales se reduzcan cercanas a cero las conductas de riesgo evaluadas en el presente estudio.

## CONCLUSIONES

Los hallazgos de esta investigación sugieren que el riesgo a sufrir percances de tránsito en los conductores de automóviles en la zona sur de Tamaulipas está presente, debido a una carencia de conocimiento sobre condiciones básicas del automóvil, como la presión de los neumáticos, el estado de la llanta de refacción y cómo medir adecuadamente los líquidos del vehículo. Esto se acentúa con la presencia de conductas como el conducir con una sola mano al volante y emplear el celular mientras se conduce. Resalta, además, que las conductas de riesgo al conducir se presentan en los conductores más jóvenes, lo que implica un desafío para las autoridades encargadas de la seguridad vial en el desarrollo de estrategias de intervención en dicha materia.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó gracias al apo-

yo otorgado por la Universidad Autónoma de Tamaulipas, a través de la Convocatoria de Investigación 2023, por el proyecto “Percepción del riesgo y conductas de riesgo asociadas al conducir un automóvil en zonas urbanas del sur de Tamaulipas: un estudio de

comparación entre 2018 y 2023”, clave UAT/SIP/INV/2023/063.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

## REFERENCIAS

- Abdullah, P. & Sipos, T. (2022). Drivers' Behavior and Traffic Accident Analysis Using Decision Tree Method. *Sustainability*, 14(18), 11339. <https://doi.org/10.3390/su141811339>
- Alonso, F., Useche, S. A., Gene-Morales, J., & Esteban, C. (2021). Compliance, practices, and attitudes towards VTIs (Vehicle Technical Inspections) in Spain: What prevents Spanish drivers from checking up their cars? *Plos One*, 16(7), e0254823. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254823>
- AMM, Asociación Médica Mundial (2024). Declaración de Helsinki de la AMM-Principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos. [En línea]. Disponible en: <https://www.wma.net/es/policias-post/declaracion-de-helsinki-de-la-amm-principios-eticos-para-las-investigaciones-medicas-en-seres-humanos/>. Fecha de consulta: 3 de junio de 2024.
- Andrade, S. y Chaparro, V. I. (2022). Relación cuantitativa entre atropellamientos y puentes peatonales en Chihuahua, México. *Revista INVI*, 37(106), 121-148. <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2022.67149>
- Cardona, D. (2023). Los motociclistas son los usuarios más vulnerables en las vías, según la carga global de los accidentes de tránsito (GBD) [Ponencia]. *Anales del X Congreso Asociación Latinoamericana de Población*, Colombia. <https://proceedings.science/alap-2022/trabajos/los-motociclistas-son-los-usuarios-mas-vulnerables-en-las-vias-segun-la-carga-gl?lang=es>
- Carro-Pérez, E. H. y Ampudia-Rueda, A. (2019). Conductas de riesgo al conducir un automóvil en zonas urbanas del sur de Tamaulipas y la Ciudad de México. *CienciaUAT*, 13(2), 100-112. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v13i2.988>
- Chacón, A. J. (2022). Medidas de seguridad vial para motociclistas de Palmira. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 2557-2576. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i6.3703](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3703)
- Chacón-MoscOSO, S., Anguera, M. T., Sanduvete-Cháves, S., Losada, J. L., Lozano-Lozano, J. A., & Portell, M. (2019). Methodological quality checklist for studies based on observational methodology (MQCOM). *Psicothema*, 31(4), 458-464. <https://doi.org/10.7334/psicothema2019.116>
- Chand, A., Jayesh, S., & Bhasi, A. B. (2021). Road traffic accidents: An overview of data sources, analysis techniques and contributing factors. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5135-5141. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.415>
- Cordellieri, P., Baralla, F., Ferlazzo, F., Sgalla, R., Piccardi, L., & Giannini, A. M. (2016). Gender Effects in Young Road Users on Road Safety Attitudes, Behaviors and Risk Perception. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01412>
- European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport (2020). Next steps towards 'Vision Zero' – EU road safety policy framework 2021-2030. Publications Office [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://data.europa.eu/doi/10.2832/391271>. Fecha de consulta: 17 de enero de 2025.
- Febres, J. D., García-Herrero, S., Herrera, S., Gutiérrez, J. M., López-García, J. R., & Mariscal, M. A. (2020). Influence of seat-belt use on the severity of injury in traffic accidents. *European Transport Research Review*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-0401-5>
- Gobierno del Estado de Tamaulipas (2010). Reglamento de Tránsito del Estado de Tamaulipas. En Periódico Oficial del Estado de Tamaulipas del 2 de diciembre de 2010. [En línea]. Disponible en: [https://po.tamaulipas.gob.mx/wp-content/uploads/2018/11/003\\_Regla\\_Transito.pdf](https://po.tamaulipas.gob.mx/wp-content/uploads/2018/11/003_Regla_Transito.pdf). Fecha de consulta: 12 de marzo de 2024.
- Goel, R., Tiwari, G., Varghese, M., Bhalla, K., Agrawal, G., Saini, G., Jha, A., John, D., Saran, A., White, H., & Mohan, D. (2024). Effectiveness of road safety interventions: An evidence and gap map. *Campbell Systematic Reviews*, 20(1). <https://doi.org/10.1002/c>

12.1367

González, E. y Vargas, G. (2024). Dispositivo adaptable a un casco de motocicleta para la visualización de parámetros al conducir. *Revista Ingenium*, 2(1), 24-55. <https://revista.uny.edu.ve/ojs/index.php/ingenium/article/view/443/445>

Hidalgo, S. (2023). La relación de los factores de personalidad y la conducción agresiva: los Cinco Grandes y la Tríada Oscura. *Acta Colombiana de Psicología*, 26(1), 188-199. <https://www.doi.org/10.14718/ACP.2023.26.1.12>

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2023). Accidentes de tránsito terrestre [Tabulados]. Accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/accidentes/>. Fecha de consulta: 3 de junio de 2024.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2024). Accidentes de tránsito terrestre [Tabulados]. Accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/accidentes/>. Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2024.

Malekpour, F., Moeini, B., Tapak, L., Sadeghi-Bazargani, H., & Rezapur-Shahkolai, F. (2021). Prediction of Seat Belt Use Behavior among Adolescents Based on the Theory of Planned Behavior. *Journal of Research in Health Sciences*, 21(4), e00536-e00536. <https://doi.org/10.34172/jrhs.2021.71>

Narváez, A. D., Basante, Y. M., Zambrano, C. A., Hernández, E. y Salas, M. E. (2022). Nivel de riesgo de estrés en conductores del sector transporte público. *Psicología y Salud*, 32(2), 351-362. <https://doi.org/10.25009/pys.v32i2.2755>

OMS, Organización Mundial de la Salud (2011). Plan mundial para el Decenio de acción para la Seguridad Vial 2011-2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2011-2020>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2024.

OMS, Organización Mundial de la Salud (2018). Accidentes de tránsito. Datos y cifras. Retrieved from. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2024.

OMS, Organización Mundial de la Salud (2021). Plan mundial. Decenio de acción para la seguridad vial 2021-2030. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030>.

for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030. Fecha de consulta: 10 de junio de 2024.

OPS, Organización Panamericana de la Salud (2023). Implementación de medidas de seguridad vial prioritarias en América Latina y el Caribe. Organización Panamericana de la Salud. [En línea]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/documentos/implementacion-medidas-seguridad-vial-prioritarias-america-latina-caribe>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2024.

Patarroyo, M. E. y Casanova J. P. (2021). Desarrollo tecnológico de un chaleco o chaqueta inteligente que permite a motociclistas ser más perceptibles en las vías. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, 1-9. <https://doi.org/10.26507/ponencia.1799>

Pérez, R., Hidalgo, E., & Híjar, M. (2021). Impact of Mexican Road Safety Strategies implemented in the context of the UN's Decade of Action. *Accident Analysis & Prevention*, 159, 106227. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106227>

Porter, B. E. (2011). *Handbook of Traffic Psychology*. Elsevier.

Rodríguez, J. M. y Urrego, D. C. (2023). Medidas poblacionales para la seguridad vial: más allá de la responsabilidad individual. *Salud UIS*, 55, e23033. <https://doi.org/10.18273/saluduis.55.e:23033>

Sedano, S. y Dorantes, G. (2020). Comportamiento agresivo, apego a normas, atribución negativa, autoestima y estrés en conductores. *Revista Electrónica de Psicología Iztacala*, 23(2): 696-723. <http://ria.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/4615/document.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

STCONAPRA, Secretariado Técnico del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (2024). Informe sobre la situación de la seguridad vial México 2022. [En línea]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/930792/Informe\\_SV\\_2022.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/930792/Informe_SV_2022.pdf). Fecha de consulta: 24 de enero de 2025.

Topal, H., Açikel, S. B., Şirin, H., Polat, E., Terin, H., Yılmaz, M. M., & Şenel, S. (2024). Evaluation of Adolescents' Awareness of Seat Belt Use and the Relationship with Risky Behaviors. *Children*, 11(6), 656. <https://doi.org/10.3390/children11060656>

Ventsislavova, P., Crundall, D., Garcia-Fernandez, P., & Castro, C. (2021). Assessing Willingness to Engage in Risky Driving Behaviour Using Naturalistic Driving Footage: The Role of Age and Gender. *In-*

*ternational Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(19), 10227. <https://doi.org/10.3390/ijerph181910227>

Ventura-León, J. L. y Caycho-Rodríguez, T. (2017). El coeficiente Omega: un método alternativo para la estimación de la confiabilidad. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud*, 15(1), 625-627.

WHO, World Health Organization (2023). Global status report on road safety 2023. [En línea]. Disponible en: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/375016/9789240086517-eng.pdf?sequence=1>. Fecha de consulta: 12 de junio de 2024.

Yan, Y., Zhong, S., Tian, J., & Song, L. (2022). Driving distraction at night: The impact of cell phone use on driving behaviors among young drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 91, 401-413. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.10.015>

Zeyin, Y., Long, S., & Gaoxiao, R. (2022). Effects of safe driving climate among friends on prosocial and aggressive driving behaviors of young drivers: The moderating role of traffic locus of control. *Journal of Safety Research*, 81, 297-304. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.03.006>



Imagen tomada de: Canva educativo

# Adicción al teléfono inteligente y preferencias sensoriales, en bachilleres y universitarios mexicanos

## Smartphone addiction and modal preferences in Mexican bachelor and college students

Ismael Esquivel-Gómez<sup>1\*</sup>, Jorge Luis Vázquez-Ariza<sup>2</sup>, Martín Guerrero-Posadas<sup>3</sup>, Julio César Berthely-Barrios<sup>1</sup>

### RESUMEN

El teléfono inteligente tiene un papel muy importante en la vida de los jóvenes, lo que preocupa por sus efectos en la salud y el rendimiento académico. El objetivo del presente estudio fue validar un instrumento piloto de medición para determinar la prevalencia de la adicción al teléfono inteligente entre bachilleres y universitarios, además de examinar su relación con las preferencias sensoriales (visual, auditiva, lectora, kinestésica). Se realizó un estudio con 141 estudiantes de bachillerato y universidad de México. Se aplicó una encuesta sobre adicción al celular y un cuestionario sobre las modalidades de percepción. Aunque el nivel de adicción promedio fue mayor en universitarios, no hubo diferencia significativa por género. La prevalencia de adicción general fue del 22 %, con “tolerancia” y “síndrome de abstinencia”, como síntomas más comunes, aunque sola la primera tuvo diferencia significativa estadística ( $P < 0.05$ ). Respecto a las preferencias sensoriales, las más indicadas fueron auditiva (29.6 %) y kinestésica (27.6 %), siendo la cantidad de uno y cuatro canales perceptivos, los más elegidos. Los universitarios prefirieron la información visual más que los bachilleres ( $P < 0.05$ ), mientras que la preferencia por la lectura/escritura fue mayor en bachilleres ( $P < 0.05$ ). Considerando la puntuación total obtenida en la encuesta como un indicador de adicción al celular, se observó que las personas que prefieren los contenidos visuales usan más el teléfono inteligente ( $\rho = 0.20$ ,  $P = 0.015$ ), mientras que las que disfrutaban de la lectura/escritura lo usan menos ( $\rho = -0.17$ ,  $P = 0.048$ ). Dichos hallazgos podrían guiar el desarrollo futuro de aplicaciones para estos dispositivos, de modo que los estudiantes reorienten el uso del teléfono inteligente en beneficio de su propio desarrollo, aprovechando los canales de percepción preferidos, aunque por supuesto, se necesitan más estudios similares en otras regiones de México.

**PALABRAS CLAVE:** teléfono inteligente, uso problemático, preferencias sensoriales, adolescentes, jóvenes.

### ABSTRACT

The smartphone plays a very important role in the lives of young people, which is of concern because of its effects on health and academic performance. The aim of the present study was to validate a pilot measurement instrument to determine the prevalence of smartphone addiction among high school and university students, in addition to examining its relationship with sensory preferences (visual, auditory, reading, kinesthetic). A study was conducted with 141 high school and university students in Mexico. A survey on cell phone addiction and a questionnaire on perception modalities were administered. Although the average level of addiction was higher in university students, there was no significant difference by gender. The prevalence of general addiction was 22 %, with “tolerance” and “withdrawal syndrome” as the most common symptoms, although only the former had a significant statistical difference ( $P < 0.05$ ). Regarding sensory preferences, the most indicated were auditory (29.6 %) and kinesthetic (27.6 %), with the number of one and four perceptual channels being the most chosen. University students preferred visual information more than high school students ( $P < 0.05$ ), while the preference for reading/writing was higher in high school students ( $P < 0.05$ ). Considering the total score obtained in the survey as an indicator of cell phone addiction, it was observed that people who prefer visual content use the smartphone more ( $\rho = 0.20$ ,  $P = 0.015$ ), while those who enjoy reading/writing use it less ( $\rho = -0.17$ ,  $P = 0.048$ ). These findings could guide the future development of applications for these devices, so that students redirect smartphone use to benefit their own development, taking advantage of preferred perceptual channels, although of course, more similar studies are needed in other regions of Mexico.

**KEYWORDS:** smartphone, problematic use, modal preferences, adolescents, young people.

\*Correspondencia: [iesquivel@uv.mx](mailto:iesquivel@uv.mx)/Fecha de recepción: 14 de mayo de 2024/Fecha de aceptación: 17 de enero de 2025/Fecha de publicación: 31 de enero de 2025.

<sup>1</sup>Universidad Veracruzana, Facultad de Administración-Región Veracruz, Puesta del Sol 24, Vistamar, Veracruz, Veracruz, México, C. P. 91780. <sup>2</sup>Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos del Estado de Veracruz (CECyTEV), Coatzacoalcos, Veracruz, México, C. P. 96535. <sup>3</sup>Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México, C.P. 78436.

## INTRODUCCIÓN

En México, independientemente de la edad, ingresos, género y ubicación, el teléfono inteligente se ha convertido en parte importante de la vida de los jóvenes y adolescentes, quienes comparten la creencia de que usarlo es benéfico (Lavín-Zatarain y col., 2019). La Asociación Mexicana de Internet (Asociación de Internet MX, 2024) realizó un estudio que mostró que un 39 % de los usuarios pasaban más de 9 h/d conectados a Internet y un 22 % entre 7 h/d y 9 h/d, reflejando un incremento con respecto al 2023. En México, preocupa el impacto social y de salud de la adicción al celular, lo que puede afectar el sueño, el estado de ánimo, la comunicación, la autoestima, el comportamiento, la ansiedad y la salud, así como el desempeño escolar. Aunque se han realizado esfuerzos para investigar los impactos en el aprendizaje apoyado por teléfonos inteligentes (Lavín-Zatarain y col., 2019) y el incremento de la actividad física mediante el uso de aplicaciones para celulares (Vergara-Torres y col., 2020), se ha encontrado que las conductas adictivas se manifiestan cuando el uso de los mismos pasa de ser un medio para convertirse en un fin (García-Santillán y Escalera-Chávez, 2020).

Entre iniciativas recientes que han suscitado gran preocupación, está la posibilidad de que un número creciente de individuos, con el uso excesivo de celulares, pudiera vincularse a actividades que promuevan conductas delictivas (Olmedo-Hernández y col., 2019). También ha sido importante conocer si la impulsividad es un factor detonante del uso problemático, lo cual ayudaría a comprender mejor el fenómeno (Becerra-Guajardo y col., 2021). De hecho, ha sido interesante determinar, si el miedo a quedarse sin celular (nomofobia) es una alteración grave que, de ser identificada y tratada oportunamente, ofrece la posibilidad de prevenir adicciones (Torres-Salazar y col., 2018). Aunque no se trata de un problema de consumo de drogas, se trata de una conducta irrefrenable, incontrolable y exagerada que hace que jóvenes y adolescentes dejen de realizar otras actividades pro-

ductivas o de ocio (Pérez-Caballero y Solis-Centeno, 2011).

Por otro lado, conforme a Dania y Marchisio (2013), es importante enfocarse en comprender las variaciones individuales de los estudiantes en cuanto a sus preferencias sensoriales al seleccionar y procesar información. El trabajo de Fleming y Mills (1992) ofrece una comprensión de estas preferencias, explicando cómo las personas reciben información a través de los sentidos (Dania y Marchisio, 2013).

Según Fleming (2012), el proceso de selección es influenciado por los intereses personales y la presentación de información. Su modelo corresponde al acrónimo de cuatro modalidades: Visual, Auditiva, Lectura/Escritura y Kinestésica (VARK, por sus siglas en inglés: Visual, Auditory, Read/Write, Kinesthetic); el cual será denominado VALK de aquí en adelante. Por ejemplo, para interesarse por un concepto, alguien puede preferir ver un diagrama (visual), escuchar una conferencia (auditivo), leer un texto (lector) o participar en una demostración práctica (kinestésico). La mayoría de las personas tienen una de cuatro modalidades más desarrollada, aunque algunas pueden usar varias (Fernández y Narváez, 2021). Existen múltiples estudios que han usado el citado modelo, mediante la aplicación del cuestionario VALK, buscando una mejoría en el aprendizaje con la adaptación de los recursos educativos a las preferencias sensoriales individuales (Ortega-Torres y col., 2020). Finalmente, Egaña y col. (2019) basados en Fleming (2012), afirman que el cuestionario VALK mide específicamente modalidades en la percepción de la información, de modo que solo proporciona información sobre las modalidades preferidas de comunicación.

Para enriquecer el presente estudio, se buscaron investigaciones previas con muestras de población mexicana de edades similares. En cuanto al uso problemático del celular, se pueden citar a Lavín-Zatarain y col. (2019),

quienes encontraron que la mayoría de los universitarios utilizaban el celular en actividades académicas, pero percibían que los docentes rara vez lo utilizaban para enseñar. Gómez-García (2018) estudió cómo los celulares y tecnologías digitales afectan los hábitos de consumo de medios, las interacciones sociales y la posible adicción a la tecnología. Torres-Salazar y col. (2018) analizaron la relación entre la nomofobia y la inteligencia cognitiva/emocional en estudiantes, encontrando indicadores confiables para detectar la nomofobia. Guzmán-Cortés y col. (2022) investigaron la capacidad de atención en universitarios con distintos niveles de uso de teléfonos inteligentes. Encontraron desafíos en la atención sostenida para aquellos con dependencia y adicción a los celulares. Betancourt-Ocampo y col. (2022) diseñaron un instrumento para evaluar la dependencia del teléfono celular en adultos. Identificaron cuatro factores principales: dificultad para realizar actividades, preocupación, conflictos interpersonales y dependencia al teléfono. Medina-Morales y Veytia-Bucheli (2022) analizaron el impacto de los dispositivos móviles en la comunicación y la posible adicción entre estudiantes de Ciencias de la Educación de dos universidades. En el trabajo de Pinto-Loria (2022), se exploró la relación entre la dependencia del teléfono móvil, la impulsividad y el riesgo de suicidio en universitarios.

En cuanto a las preferencias sensoriales medidas con el instrumento VALK, Fernández y Narváez (2021) encontraron que la mayoría de los estudiantes de inglés en Veracruz, México, tenían una preferencia única auditiva, aunque algunos mostraban preferencias mixtas. Las entrevistas revelaron que los estudiantes adaptan estrategias según sus preferencias. Vargas y col. (2023) estudiaron el aprendizaje reflexivo en más de 1 600 universitarios en diferentes regiones de México. Los resultados indicaron que el estilo de aprendizaje basado en la lógica fue el más común (40 %), seguido del memorístico (33 %), siendo el reflexivo el menos utilizado (27 %). Además, se encontró una correlación significati-

va entre la preferencia kinestésica y estilos de aprendizaje basados en la lógica y la memorización. En una universidad privada del norte de México, Jiménez y col. (2019) identificaron las percepciones sensoriales preferidas por 199 estudiantes del tercer semestre de Odontología, mayormente mujeres. Se descubrió que, los participantes tenían dos modalidades preferidas, una de un canal de percepción y otra de tres canales. En un estudio realizado por Torres y col. (2023), se examinaron las diferentes formas en que 305 estudiantes de nuevo ingreso de enfermería en México perciben la información. Los resultados mostraron que más de la mitad de los estudiantes utilizaban múltiples canales de percepción. El estudio de Olvera y col. (2023) en la Facultad de Informática de Mazatlán, México, investigó en 158 estudiantes y 35 catedráticos, la relación entre estilos de aprendizaje, de enseñanza y el rendimiento académico. Se destacó el predominio del estilo de aprendizaje reflexivo entre estudiantes (34 %) y la preferencia sensorial kinestésica entre profesores (40 %), arrojando una falta de correspondencia entre el estilo de enseñanza y de aprendizaje. Pizarro (2021) examinó el impacto de un aula virtual multi-modal adaptada a las preferencias de modalidad sensorial, según el modelo VALK. Los estudiantes informaron que este enfoque multisensorial les facilitaba la comprensión, los motivaba y mejoraba su rendimiento académico. Sarmiento y col. (2021) investigaron sobre las preferencias sensoriales de estudiantes de bachillerato en el sureste de México y diseñaron estrategias de enseñanza con tecnologías digitales.

Debido a la evidencia de la adicción al teléfono por parte de los adolescentes y jóvenes mexicanos, y a la escasez de investigaciones similares en el país, donde se sugiera aprovechar esta herramienta tecnológica para cuestiones académicas, mediante una presentación de la información de acuerdo a los intereses personales y preferencias sensoriales individuales, es que se hizo necesario indagar en el tema.

El objetivo de este trabajo fue validar un instrumento piloto de medición para determinar la prevalencia de la adicción al teléfono inteligente entre bachilleres y universitarios, además de examinar su relación con las preferencias sensoriales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una investigación descriptiva, transversal y prospectiva, desde una perspectiva cuantitativa.

### Muestra

Se realizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, en grupos preexistentes de tres instituciones mexicanas de carácter público, dos de nivel universitario y una de bachillerato. Se estableció como criterio de inclusión que los participantes fueran estudiantes regulares matriculados en un ciclo escolar, mientras que el criterio de exclusión fue la falta de respuesta a la totalidad de los instrumentos previstos.

### Participantes

Del 17 al 31 de mayo de 2023, 141 estudiantes completaron los instrumentos del estudio, de los cuales 58 eran bachilleres adscritos al programa de técnico en mantenimiento y producción industrial en Coatzacoalcos, Veracruz, México, y 83 estudiantes universitarios de ingeniería en sistemas computacionales, en San Luis Potosí capital. Participaron 43 mujeres en nivel de bachilleres y 34 en el grupo universitario. En el primer grupo, la edad promedio fue de 16.24 años con una desviación estándar de 1.218, mientras que, en el grupo universitario, fue de 20.87 años con una desviación estándar de 1.853.

### Instrumentos

#### Adicción al teléfono inteligente

Se empleó la escala de adicción al teléfono inteligente en su versión abreviada (SAS-SV, por sus siglas en inglés: Smartphone Addiction Scale - Short Version) desarrollada originalmente por Kwon y col. (2013), adaptada al español por Lopez-Fernández (2017) para universitarios españoles y adaptada al contexto mexi-

cano por Esquivel-Gómez y col. (2024b). Se trata de un cuestionario unidimensional, aunque algunas investigaciones al adaptarlo a su idioma, han explorado estructuras multifactoriales (García-Santillán y Escalera-Chávez, 2020; Zhao y col., 2022). La encuesta ha demostrado alta consistencia interna, con un coeficiente alfa de Cronbach entre 0.79 y 0.95, y en estudios con población mexicana, el rango ha sido de 0.81 a 0.89 (Esquivel-Gómez y col., 2024b). La confiabilidad test-retest ha entregado coeficientes altos (ICC: 0.83 a ICC: 0.97) (Al-Qarni y El-Keshky, 2022; Zhao y col., 2022). Conforme a Servidio y col. (2022), ha mostrado una validez de constructo sólida, respaldada por análisis factoriales confirmatorios (CFI > 0.95, RMSEA < = 0.06). La validez concurrente ha entregado correlaciones significativas (Harris y col., 2020) con instrumentos que miden la adicción a teléfonos inteligentes con los instrumentos: Inventario de Ansiedad y Fobia Social (SPAI, por sus siglas en inglés: Social Phobia and Anxiety Inventory) y la Escala de Adicción basadas en aplicaciones para teléfonos inteligentes (SABAS, por sus siglas en inglés: Smartphone Application-Based Addiction Scale) ( $r = 0.83$ ,  $P < 0.010$ ) y la adicción al Internet ( $r = 0.71$ ,  $P < 0.010$ ).

En cuanto a la validez convergente, se ha encontrado asociación fuerte con la depresión entre los jóvenes saudíes, moderadamente entre adolescentes chinos y débilmente asociado entre universitarios estadounidenses (Hamamura y col., 2023). Por otro lado, ha mostrado correlaciones más bajas con constructos no relacionados como el autoescapismo ( $r = 0.19$ ,  $P < 0.01$ ), lo que apoya su validez divergente (Nooripour y col., 2022).

La escala tipo Likert consta de 10 ítems con 6 posibles opciones de respuesta, que van desde “fuertemente en desacuerdo” (1) hasta “fuertemente de acuerdo” (6). De los 60 puntos totales, el nivel potencial de uso excesivo o adicción es de 31 para hombres y 33 para mujeres, en tanto que el nivel de uso en riesgo potencial es de 22 puntos para ambos géneros. Para responder la escala, los parti-

participantes debían proporcionar un identificador personal asignado previamente, su género, edad y los diversos usos que daban al celular. A partir de este punto, el instrumento se identificará con las siglas SAS-SV, y el término “celular” se utilizará como sinónimo de “teléfono inteligente”.

En su adaptación, Lopez-Fernández (2017) identificó 6 síntomas de adicción cubiertos por la escala: pérdida de control, trastorno familiar o escolar, desprecio de las consecuencias, síndrome de abstinencia, preocupación y tolerancia. Los ítems 1 y 8 se refieren a la pérdida de control. Los ítems 2 y 10 se relacionan con trastornos familiares o escolares. Los ítems 3 y 7 indican desprecio por las consecuencias. Los ítems 4 y 5 están asociados con el síndrome de abstinencia. El ítem 6 es sobre la preocupación y el ítem 9 se refiere a la tolerancia. Para calcular el puntaje de cada síntoma, se promedian los ítems correspondientes. Si el puntaje resultante es mayor a tres, indica que el síntoma está presente. Conforme a lo anterior, se calcularon la frecuencia y el porcentaje correspondiente por síntoma para los usuarios potencialmente excesivos.

### **Preferencias sensoriales de recepción de información**

Se usó el cuestionario VALK, el cual explora cómo prefiere una persona recibir la información. Las preguntas están relacionadas con diferentes situaciones de la vida diaria para evaluar las preferencias sensoriales visual, auditiva, lectora/escritora y kinestésica. Por su naturaleza, el instrumento se trata de un cuestionario formado de 16 preguntas de cuatro ítems dicotómicos cada una (Leite y col., 2010). Por ello, los análisis factoriales confirmatorios más adecuados son los denominados métodos múltiples para medir múltiples rasgos (Wong y Chin, 2018). Como resultados, las estimaciones de fiabilidad encontradas van desde 0.73, 0.79, 0.84 y 0.69 hasta 0.85, 0.82, 0.84 y 0.77 para las subescalas visual, auditiva, lectura/escritura y kinestésica, respectivamente. Las correlaciones entre tales subescalas, van de moderadas ( $r = 0.416$ ) a fuertes ( $r = 0.799$ ) en

magnitud (Leite y col., 2010; Wong y Chin, 2018). En este trabajo, se ha utilizado la versión en español del instrumento (VARK™ questionnaire © Copyright version 7.8 2014 held by VARK Learn Limited, Christchurch, New Zealand). Las preguntas usadas provienen del cuestionario reportado en Fuentes-Mejía y col. (2018).

### **Procedimiento**

#### **Aplicación**

Los instrumentos fueron implementados mediante formularios electrónicos independientes, los cuales fueron distribuidos por los investigadores durante sus clases, asignando previamente un identificador a cada participante. Las sesiones se llevaron a cabo en salas de cómputo para universitarios y en aulas para bachilleres. Se proporcionaron instrucciones claras y se resolvieron dudas antes de comenzar cada aplicación. En una sola sesión, se administró la escala SAS-SV de acuerdo a Esquivel-Gómez y col. (2024b), previa lectura detenida de cada ítem y solicitud de respuestas honestas. De manera similar, durante una sesión se aplicó el cuestionario VALK, conforme a Fuentes-Mejía y col. (2018), enfatizando que los participantes podían seleccionar varias respuestas por pregunta o dejarla en blanco.

#### **Procesamiento de los datos**

En su mayoría se analizaron utilizando el software Paquete estadístico para ciencias sociales (SPSS, por sus siglas en inglés: Statistical Package for the Social Sciences) versión 25. Inicialmente, se aplicó la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov para determinar la normalidad de los datos. Con ello, se procedió a aplicar los estadísticos correspondientes. Al principio, para evaluar el desempeño de los distintos ítems del SAS-SV, se empleó el alfa de Cronbach para medir la consistencia interna.

Dado que el instrumento es una escala tipo Likert y en ausencia de normalidad, se realizó un análisis factorial exploratorio (AFE) con matriz de correlaciones policóricas, si-

guiendo el enfoque de García-Santillán y col. (2022). Para ello, se empleó el software Factor versión 12, realizando un cálculo de correlaciones para determinar si la matriz de datos era una matriz de identidad, lo que podría impedir la aplicación del AFE.

Otras medidas que permitieron justificar la pertinencia de la técnica factorial fueron la prueba de esfericidad de Bartlett con el Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), la prueba Chi<sup>2</sup> con n grados de libertad y la significancia ( $P < 0.01$ ), las medidas de adecuación muestral para cada variable y las cargas factoriales. Para comparar medias entre géneros y niveles de estudio, se usó la prueba de U de Mann-Whitney, porque los datos no seguían una distribución normal.

Para determinar la existencia de significancia en la relación de niveles de riesgo en el uso del celular, con el nivel académico y con el género, se usó la prueba Chi<sup>2</sup>. En línea con lo anterior, se aplicó el estadístico exacto de Fisher, para los casos en los cuales, no se cumplía el criterio de que las frecuencias esperadas en las celdas, fueran mayores a 5. De igual manera, para determinar los restantes niveles de asociación, se aplicó el estadístico de correlación rho de Spearman.

### Consideraciones éticas

El protocolo de investigación fue registrado y autorizado por la institución del investigador adscrito al bachillerato. Se contó con el permiso de la institución de adscripción de los estudiantes encuestados, a quienes previamente se les informó sobre el propósito, productos, mecánica y duración de las actividades. Posteriormente, firmaron una carta de consentimiento informado (en el caso de los menores, se considera de asentimiento informado, por no tener el consentimiento de los padres) y se verificó su acceso a los instrumentos, con los datos proporcionados.

Se respetaron los principios éticos de la investigación mediante la protección a la privacidad y de los datos personales, evitando causar daño físico, emocional o psicológico, y se

proporcionó a todos los participantes un trato justo y equitativo. También, se ha respetado el derecho a participar y se ha conducido la investigación de manera honesta y transparente, siguiendo los principios descritos por Koepsell y Ruiz-de-Chávez (2015).

## RESULTADOS

### Adicción al celular

El coeficiente del alfa de Cronbach del instrumento fue de 0.88 y la Chi<sup>2</sup> = 846 ( $P < 0.001$ ) con 45 grados de libertad; se verificó que las variables eran adecuadas para la aplicabilidad del AFE. Todos los valores de la medida de adecuación muestral fueron óptimos al ser superiores a 0.50 (Lorenzo-Seva y Ferrando, 2021) y el estadístico de la prueba KMO fue de 0.88. Además, todas las correlaciones fueron diferentes de cero y el AFE reveló un solo factor que explicaba el 59.4 % de la varianza total.

En la Tabla 1 se muestra el valor promedio y la desviación estándar obtenido por cada ítem, además de la asociación ítem-total corregida para cada ítem, y los coeficientes de carga y de comunalidad, asociados a dicho análisis. La media del puntaje de adicción en general fue de  $24.07 \pm 10.1$ , que es superior al límite de 22 puntos establecido para el nivel de riesgo potencial. Se encontró diferencia significativa ( $P < 0.001$ ) en la puntuación media obtenida por bachilleres (20.3, DT = 9.6), respecto a la de los universitarios (27.0, DT = 9.6). Sin embargo, no se encontró diferencia significativa ( $P > 0.05$ ) asociada con el sexo de los participantes.

En cuanto al nivel de riesgo en el uso del celular (Tabla 2), solo se encontró diferencia significativa ( $P < 0.001$ ) asociada al nivel de estudio, sin que hubiese diferencia asociada al sexo. En total, 31 participantes (8 bachilleres y 23 universitarios) presentaron un nivel de “uso excesivo de celular”, con una mayor tasa de riesgo los universitarios (27.7 %) que los bachilleres (13.8 %).

En cuanto al sexo, no existieron diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) en esta variable en

■ **Tabla 1. Descriptivos de los ítems y correlaciones ítem-total corregidas.**  
Table 1. Item descriptives and corrected item-total correlations.

Ítem	Media	Desv. típica	Asociación ítem-total corregida	Carga	Comunalidad
1. “Debido al uso del celular, he dejado de hacer tareas/actividades/trabajos/etc., que tenía planeado”	2.58	1.429	0.869	0.523	0.274
2. “Debido al uso del celular, he tenido problemas de concentración, mientras estudiaba o trabajaba”	2.70	1.506	0.876	0.500	0.250
3. “Debido al uso del celular, he sentido dolor en alguna de mis muñecas o en el cuello”	2.10	1.506	0.873	0.551	0.304
4. “No puedo estar sin mi celular”	2.61	1.736	0.853	0.845	0.713
5. “Me siento impaciente o inquieto cuando no tengo mi celular”	2.41	1.583	0.853	0.829	0.687
6. “Tengo mi celular en mente, incluso cuando no lo uso”	2.02	1.422	0.855	0.851	0.724
7. “Nunca dejaré de usar mi celular, aunque afecte a mi vida cotidiana”	2.06	1.272	0.861	0.767	0.588
8. “Continuamente estoy comprobando mi celular, para no perderme de conversaciones en mis redes sociales”	2.47	1.476	0.859	0.758	0.575
9. “Uso mi celular más de lo que había previsto inicialmente”	2.88	1.490	0.860	0.742	0.551
10. “Familiares o amigos, me dicen que uso demasiado el celular”	2.23	1.451	0.874	0.558	0.311

■ **Tabla 2. Distribución de participantes por nivel de uso percibido del teléfono inteligente de acuerdo al nivel académico y sexo.**  
Table 2. Distribution of participants by perceived level of smartphone use according to academic level and gender.

Nivel	Nivel académico		P*	Sexo		P*
	Bachilleres	Universitarios		Femenino	Masculino	
Sin riesgo	39	27	0.001	28	38	0.234
En riesgo	11	33		12	32	
Excesivos	8	23		13	18	
Total	58	83		53	88	

\*Prueba exacta de Fisher.

ninguno de los dos niveles académicos (Tabla 3).

Los 31 estudiantes evaluados con un nivel de uso excesivo del celular (Tabla 4) presentaron tasas de incidencia altas en “tolerancia” (87.1 %) y “síndrome de abstinencia” (77.4 %); mientras que “desprecio de las consecuencias” fue el de menor porcentaje (35.5 %). El análisis por nivel académico mostró que solo el síntoma “tolerancia” fue diferente significativamente ( $P < 0.05$ ) entre niveles académicos, presentándose en todos los universitarios de este subgrupo (100 %). Dicho resultado concuerda con el hecho de que los estudiantes de nivel universitario manifestaron significativamente

( $P < 0.001$ ) mayor nivel de riesgo que los de bachillerato (Tabla 2).

### Modalidad preferida

El 34 % de los encuestados seleccionaron solo uno de los cuatro canales de comunicación como el que prefieren utilizar (Tabla 5), donde el 16.3 % obtuvo mayor preferencia por el canal auditivo, seguido del 10.6 % por el kinestésico. El 17.7 % de los estudiantes manifestaron usar dos canales, destacando la combinación visual/kinestésico y auditivo/kinestésico, con 5 % de preferencia ambos. En tanto que, 14.9 % utilizaban 3 canales, destacando la combinación de visual/auditivo/kinestésico con 8.5 %. El 33.3 % de los encues-

■ **Tabla 3. Distribución de participantes por nivel de uso percibido del teléfono inteligente y sexo de acuerdo al nivel académico.**

Table 3. Distribution of participants by perceived level of smartphone use and gender according to academic level.

Nivel	Bachilleres		P*	Universitarios		P*
	Femenino	Masculino		Femenino	Masculino	
Sin riesgo	19	20	0.154	9	18	0.788
En riesgo	2	9		10	23	
Excesivos	4	4		9	14	
Total	25	33		28	55	

\*Prueba exacta de Fisher.

■ **Tabla 4. Frecuencia de incidencia por síntoma y nivel de estudios (usuarios excesivos) conforme a la escala SAS-SV.**

Table 4. Frequency of incidence by symptom and by educational level (excessive users) according to the SAS-SV scale.

Síntoma	Bachilleres N = 8		Universitarios N = 23		Total N = 31		Fisher* (Valor P)
	n	(%)	n	(%)	n	(%)	
1. Pérdida de control	4	(50.0)	15	(65.2)	19	(61.3)	0.689
2. Trastorno familiar o escolar	3	(37.5)	11	(47.8)	14	(45.2)	1.000
3. Desprecio de las consecuencias	3	(37.5)	8	(34.8)	11	(35.5)	1.000
4. Síndrome de abstinencia	5	(62.5)	19	(82.6)	24	(77.4)	0.634
5. Preocupación	5	(62.5)	14	(60.9)	19	(61.3)	1.000
6. Tolerancia	4	(50.0)	23	(100.0)	27	(87.1)	0.010

\*Prueba exacta de Fisher.

**Tabla 5. Frecuencia y porcentaje por modalidad de VALK y por nivel educativo.**  
 Table 5. Frequency and percentage by VALK modality and by level of education.

Número de canales	Modalidades	Total		Bachilleres		Universitarios		P*
		n	%	n	%	n	%	
1		48	34.0	23	39.7	25	30.1	0.682
	V	7	5.0	2	3.4	5	6.3	
	A	23	16.3	11	19.0	12	15.0	
	L	3	2.1	2	3.4	1	1.3	
	K	15	10.6	8	13.8	7	8.8	
2		25	17.7	9	15.5	16	19.3	0.326
	VA	6	4.3	2	3.4	4	5.0	
	VK	7	5.0	1	1.7	6	7.5	
	AL	2	1.4	2	3.4	0	0.0	
	AK	7	5.0	3	5.2	4	5.0	
	LK	3	2.1	1	1.7	2	2.5	
3		21	14.9	11	19.0	10	12.0	0.088
	VAL	3	2.1	3	5.2	0	0.0	
	VAK	12	8.5	4	6.9	8	10.0	
	ALK	6	4.3	4	6.9	2	2.5	
4	VALK	47	33.3	15	25.9	32	38.6	N/D

\*Prueba de Fisher.

N/D = No se ha calculado el estadístico, porque es una sola modalidad.

tados refirieron usar los 4 canales de manera no preferencial. Por nivel educativo (Tabla 5), no se encontró diferencia significativa ( $P > 0.05$ ) para cada una de las cantidades de canales preferidos. Tampoco se encontró diferencia significativa ( $P > 0.05$ ) entre el grupo con uso excesivo respecto al total, para cada una de las cantidades de canales (Tabla 6).

### Asociación entre instrumentos

El análisis de las 3 274 elecciones totales permitió observar que la población estudiada seleccionó en primer lugar al canal auditivo (29.6 %), seguido del kinestésico (27.6 %) y como última opción al de lectura/escritura (19.3 %). En ambos niveles académicos la tendencia en la preferencia por los canales fue similar (Tabla 7). Sin embargo, el análisis de varianza de un solo factor mostró que, al analizar el promedio de sus elecciones, los universitarios prefirieron la información visual más que los bachilleres ( $P < 0.05$ ), mientras que los bachilleres tuvieron mayor preferencia por la lectura/escritura ( $P < 0.05$ ) (Tabla 8).

Por género en cambio, no se encontró diferencia significativa de las medias. En cuanto a los niveles de asociación, de acuerdo al estadístico rho de Spearman, no existió correlación significativa entre el nivel de adicción y los dos canales preferidos, auditivo y kinestésico ( $\rho = -0.02$ ,  $P = 0.794$  y  $\rho = -0.03$ ,  $P = 0.751$ , respectivamente). En cambio, se encontró una relación baja, pero positiva y significativa entre la adicción y la preferencia visual ( $\rho = 0.20$ ,  $P = 0.015$ ). La preferencia lectora/escritora presentó relación negativa y baja, pero estadísticamente significativa ( $\rho = -0.17$ ,  $P = 0.048$ ).

## DISCUSIÓN

### Sobre el uso problemático del celular

El instrumento que se aplicó arrojó resultados adecuados, con un coeficiente de confiabilidad de 0.88, similar al de Lopez-Fernandez (2017) (0.79 y 0.95) y Esquivel-Gómez y col. (2024b) (0.81 a 0.89), y una varianza total explicada de 54.9 %, mayor en un 10 % y un 5 %, respectivamente. En cuanto a la población estudiada, no

■ **Tabla 6. Frecuencia y porcentaje por modalidades VALK del total de la muestra y por uso excesivo.**  
Table 6. Frequency and percentage by VALK modalities from the total sample and by excessive use.

Número de canales	Modalidades	Total (n = 141)		Uso excesivo (n = 31)		P*
		n	%	n	%	
1		48	34.0	8	25.8	0.925
	V	7	5.0	1	3.2	
	A	23	16.3	5	16.1	
	L	3	2.1	0	0.0	
2	K	15	10.6	2	6.5	0.581
		25	17.7	9	29.0	
	VA	6	4.3	1	3.2	
	VK	7	5.0	4	12.9	
	AL	2	1.4	0	0.0	
	AK	7	5.0	3	9.7	
3	LK	3	2.1	1	3.2	0.374
		21	14.9	3	9.7	
	VAL	3	2.1	1	3.2	
	VAK	12	8.5	2	6.5	
4	ALK	6	4.3	0	0.0	N/D
	VALK	47	33.3	11	35.5	

\*Prueba de Fisher.

N/D = No se ha calculado el estadístico, porque es una sola modalidad.

■ **Tabla 7. Puntuación acumulada que recibió cada preferencia sensorial (individual o combinada) y tasa relativa calculada.**

Table 7. Cumulative score of each sensory preference (individual or combined) and calculated relative rate.

Nivel	V		A		L		K		Total
	n	%	n	%	n	%	n	%	n
Bachilleres	274	21	408	31	286	22	343	26	1 311
Universitarios	492	25	562	29	347	18	562	29	1 963
Total	766	23.4	970	29.6	633	19.3	905	27.6	3 274

hubo diferencia significativa ( $P > 0.05$ ) del puntaje global entre géneros, como en ambos estudios. Sin embargo, la proporción de usuarios adictos fue casi el doble (22 %) al del primer trabajo (13 %) y similar al del segundo (30 %). Se presentó una asociación positiva significativa ( $P < 0.05$ ) entre la edad y el nivel de adicción, a diferencia del primer trabajo donde fue negativa y del segundo donde no existió.

También se encontró una asociación estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ) entre el nivel de estudios y el nivel de uso del teléfono inteligente.

En ambas poblaciones, en el presente estudio, en general, los síntomas de adicción prevalentes fueron “tolerancia” y “síndrome de abstinencia”, mientras que “desprecio de las consecuencias” fue el menos encontrado. Los

■ **Tabla 8. Análisis de varianza de la puntuación promedio que recibió cada preferencia sensorial (individual o combinada).**

Table 8. Analysis of variance of the average score received by each sensory preference (individual or combined).

Nivel	V		A		L		K	
	M	DT	M	DT	M	DT	M	DT
Bachilleres	4.72 <sup>a</sup>	2.134	7.03 <sup>a</sup>	3.255	4.93 <sup>a</sup>	1.981	5.91 <sup>a</sup>	2.563
Universitarios	5.93 <sup>b</sup>	2.659	6.77 <sup>a</sup>	2.706	4.18 <sup>b</sup>	2.108	6.77 <sup>a</sup>	2.778
Total	5.43	2.519	6.88	2.936	4.49	2.083	6.42	2.715

M = Media; DT = Desviación típica.

<sup>a,b</sup>Letras distintas indican diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre nivel académico para una misma preferencia sensorial.

universitarios tuvieron los mismos síntomas prevalentes, mientras que los bachilleres experimentaron mayores síntomas de adicción para “síndrome de abstinencia” y “preocupación” (Tabla 4). Lo anterior, y conforme a Kwon y col. (2013), implica que los universitarios no podían dejar de usar el celular por más que lo intentaran, además de percibirse impacientes e intolerables cuando no lo tenían y cuando lo usaban, se molestaban si alguien los interrumpía. Este comportamiento también se observó en los bachilleres, quienes mostraron preocupación constante por el dispositivo y, además experimentaron intranquilidad al pensar continuamente en el teléfono, incluso cuando no lo usaban, como establece el mismo autor. Similar a ambos trabajos, el síntoma menos respaldado fue “desprecio por las consecuencias físicas o psicológicas”, lo cual implica que fueron poco consideradas las alteraciones de su vida cotidiana, y las dolencias derivadas del abuso del dispositivo (Kwon y col., 2013). Asimismo, quizá debido a la mayor disponibilidad de acceso a internet que tenían los universitarios, reportaron una adicción por encima de los bachilleres, quienes aparte pensaban continuamente en su celular, incluso cuando no lo usaban, posiblemente por la novedad que representaba su uso.

Los niveles de consistencia interna y varianza total, en el actual instrumento, fueron si-

milares al del instrumento de 19 ítems sobre uso excesivo del celular, desarrollado por Betancourt-Ocampo y col. (2022), aunque en su caso el tamaño de la muestra ( $n = 301$ ) y el rango de edad, fueron mayores (20 a 50 años). Su escala arrojó cuatro factores (preferencia con actividades, preocupación, problemas interpersonales y apego al celular), que se asociaban a los síntomas de adicción (pérdida de control, preocupación, trastorno familiar y síndrome de abstinencia, respectivamente) planteados por Lopez-Fernández (2017) para la escala SAS-SV.

A diferencia de Betancourt-Ocampo y col. (2022), ahora se compararon diferentes grupos de edades y se encontró que los jóvenes tienen más adicción que los adolescentes. Aunque hay similitud en cuanto a los usos reportados (actividades lúdicas, principalmente), hay contraposición a Lavín-Zatarain y col. (2019), quienes detectaron un mayor uso para fines académicos, pero una limitante de su estudio es que el tamaño de su muestra fue pequeño ( $n = 23$ ).

Medina-Morales y Veytia-Bucheli (2022), reportaron la presencia de efectos negativos asociados al uso del teléfono inteligente por parte de los participantes, los cuales se traducen en malestares físicos, aislamiento y descuido de algunas tareas. En el presente trabajo esos síntomas fueron menos frecuen-

tes (ítems 3 y 7: desprecio de las consecuencias; ítems 2 y 10: trastorno familiar o escolar; ítems 1 y 8: pérdida de control (Tabla 1).

Además de los efectos negativos previamente documentados, en el trabajo de Guzmán-Cortés y col. (2022), se encontraron diferencias en la atención sostenida entre usuarios con distintos niveles de uso de dispositivos móviles, afectando en mayor medida a aquellos con mayores niveles. En comparación con ellos, quienes usaron una escala de 30 ítems, una prueba Go-No Go y la falta de una evaluación más amplia, el estudio de Esquivel-Gómez y col. (2024a) no reportó diferencias en la memoria operativa y la inteligencia fluida, entre usuarios con distintos niveles de adicción.

### Sobre las preferencias sensoriales

El cuestionario VALK se enfoca en indicar cómo se prefiere aprender, lo cual se construye entre los 12 a 20 años, pero puede cambiar dependiendo del ambiente de desarrollo. Las modalidades detectadas por el instrumento coexisten, ya que los límites entre las mismas son borrosos (Fleming, 2012). En el caso de los universitarios, un 30.1 % tuvo una sola preferencia y un 38.6 % las cuatro (Tabla 5). De sus 1 963 elecciones totales, al dividir las correspondientes a cada canal, se obtuvieron las siguientes proporciones: auditivo y kinestésico (29 % cada uno), visual (25 %) y lector (18 %) (Tabla 7). Fernández y Narváez (2021) encontraron resultados similares, ya que los 69 alumnos de un programa de inglés tenían mayor preferencia por la modalidad auditiva, pero la segunda opción en su caso era la lectura/escritura. La mayoría de sus encuestados eligió una sola opción en lugar de las cuatro disponibles a diferencia del presente trabajo, donde la más popular para los universitarios fueron las cuatro modalidades (Tabla 5). El estudio de Vargas y col. (2023) con participantes de diferentes programas, regiones y sostenimiento, arrojó una preferencia principal por el canal kinestésico, similar al encontrado en el presente trabajo (31 % *vs* 29 %). Llama la atención que, en sus 1 619 participantes, la modalidad lectora/escritora fue la segun-

da más elegida. Con respecto a los resultados de Jiménez y col. (2019) con estudiantes de Odontología, hay similitud en cuanto a las preferencias por lo auditivo y kinestésico, aunque en su caso, aparecieron como segundo y tercer lugar de preferencia (24 % auditivo y 23 % kinestésico), siendo la modalidad visual, la mayor (34 %). También, como en el caso de Torres y col. (2023) quienes trabajaron con 305 estudiantes de enfermería, hubo similitud en la proporción de unimodales (34 % *vs* 30 %) y en la selección principal por la modalidad kinestésica, aunque en su caso la modalidad lectora/escritora fue la segunda más elegida, como en Vargas y col. (2023). Finalmente, en el estudio de Olvera y col. (2023) aplicaron el cuestionario VALK a 35 profesores, encontrando mayores preferencias por las modalidades kinestésica (40 %) y lectora/escritora (31 %).

Asimismo, en el nivel bachillerato una proporción del 39.7 % eligió un solo canal de preferencia sensorial y un 25.9 %, los cuatro. De las 1 311 elecciones totales, al dividir las correspondientes a cada canal, se han encontrado las proporciones: auditiva (31 %), kinestésica (26 %), lectora/escritora (22 %) y la visual (21 %). Estos hallazgos se contraponen a Sarmiento y col. (2021), quienes en 138 bachilleres encontraron que el 28.1 % eran kinestésicos, el 28.1 % visuales, el 25.1 % lectores/escritores y el 18.7 % auditivos.

La proporción de participantes multimodales del presente trabajo en ambos niveles educativos (60 % en bachillerato y 70 % en licenciatura) se alinearon a Fleming (2012), quien indica que la misma es muy común en dos terceras partes del estudiantado. El mismo autor, señala que las personas multimodales pueden ser más flexibles, durante el proceso de aprendizaje y que es poco probable que una muestra exhiba en más de 40 % una sola modalidad. En este estudio, los bachilleres casi alcanzaron ese porcentaje, posiblemente porque sus preferencias aún están en desarrollo. Adicionalmente, es notable, que la preferencia kinestésica, la cual se alimenta de captar la

realidad de experiencias (Fleming, 2012), ha sido una de las más elegidas en los diversos estudios. También, llama la atención que, en cuatro trabajos, la segunda elección correspondió a la lectora/escritora, no obstante que los participantes eran de diferentes regiones del país. Una posible explicación es la diferencia en las preguntas del cuestionario utilizado y la limitada distribución geográfica de los participantes (centro y sureste) que se tuvo. Adicionalmente, una distinción puede ser el tipo de estudios que cursaban los diversos participantes.

Romero-Amado (2020), señala que actualmente existe una mayor distribución de la oferta cultural que antes, a través de los celulares. Indica también que, es importante investigar cómo está cambiando el consumo cultural y las preferencias de los jóvenes para entender el impacto en su desarrollo profesional y social. Ello en relación con lo encontrado en el presente trabajo, donde se reportó una asociación significativa positiva baja, de que a mayor adicción mayor preferencia por contenidos del tipo visual; y también se presentó una asociación significativa negativa baja, de que a menor adicción, mayor preferencia por contenidos del tipo escrito (Tabla 8). Esto puede deberse a que los contenidos visuales ofrecen estímulos placenteros, inmediatos y variados, como videos y redes sociales, que activan sistemas de recompensa en el cerebro (Sabater, 2023). Su consumo rápido y breve en los celulares se alinea con esta preferencia, mientras que quienes prefieren contenidos escritos, requieren de mayor concentración y lectura prolongada, por lo que no encuentran el mismo nivel de gratificación instantánea (Pérez-Rodríguez (2024). Por supuesto que, limitado a la muestra que se encuestó, los recursos digitales distribuidos para fines académicos podrían contener principalmente diagramas, imágenes, dibujos, gráficos, símbolos y colores, y en menor medida textos a manera de listas, diccionarios, resúmenes, libros y manuales. Se trata de atrapar la atención del estudiante con recursos atractivos, para que al usar el celular, se mueva del consumo hedonístico al consumo productivo.

Según Torres-Salazar y col. (2018) y Loria (2022), la adicción al celular podría estar relacionada con impulsividad y falta de autocontrol. Por lo tanto, es importante utilizar la escala SAS-SV junto con otras para detectar a tiempo a las personas en riesgo suicida y tomar las medidas necesarias. En consonancia con Betancourt-Ocampo y col. (2022), es necesario aplicar la escala a más muestras, que permita tener una mayor variabilidad en características regionales y sociodemográficas. De acuerdo con Gómez-García (2018), Lavín-Zatarain y col. (2019), Esquivel-Gámez y col. (2024a), es aconsejable implementar estrategias al interior del aula para la incorporación del celular al proceso enseñanza-aprendizaje-evaluación. Además, es importante fomentar el consumo crítico de contenidos digitales en los primeros semestres, como mencionan Gómez-García (2018) y Romero-Amado (2020).

## CONCLUSIONES

El instrumento aplicado arrojó resultados adecuados de confiabilidad y validez en las poblaciones de estudiantes seleccionados. El nivel de uso problemático del celular fue significativamente mayor en universitarios que en bachilleres. En los primeros, los síntomas adictivos prevalentes fueron “tolerancia” y “síndrome de abstinencia”, mientras que, en los segundos, “síndrome de abstinencia” y “preocupación”. En cuanto a las preferencias sensoriales, quedó de manifiesto que las modalidades auditiva y kinestésica fueron muy apreciadas; en cambio, la modalidad lectora/escritora fue poco elegida. Hasta donde los autores saben, este trabajo representa el primer pilotaje sobre la asociación entre las modalidades de percepción según el modelo VALK y la adicción a teléfonos inteligentes entre mexicanos. La preferencia visual está asociada a mayor uso del celular y la lectora/escritora, a un menor uso. Por supuesto que, dado el valor de los coeficientes de asociación, estos hallazgos han de tomarse con cautela. Con base en los resultados, se recomienda que los docentes migren su práctica al interior del aula, hacia el ámbito del celular, de modo que influyan para que los estudiantes

lo perciban como aliado en el aumento de su productividad y eficiencia, además del entretenimiento.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

## REFERENCIAS

- Al-Qarni, M. S. & El-Keshky, M. E. (2022). Psychometric properties of the Arabic short version of the smartphone addiction scale (SAS-SV) in Saudi Arabia. *JKAU Arts Humanit*, 30, 400-414. <https://doi.org/10.4197/Art.30-2.14>
- Asociación de Internet MX (2024). 20° Estudio sobre los Hábitos de Usuarios de Internet en México 2024. Asociación de Internet MX. [En línea]. Disponible en: <https://www.asociaciondeinternet.org.mx/habitos-usuarios-internet-2024.pdf>. Fecha de consulta: 16 de agosto de 2024.
- Becerra-Guajardo, J. R., López-Rosales, F. y Jasso-Medrano, J. L. (2021). Uso problemático de las redes sociales y teléfono móvil: impulsividad y horas de uso. *Revista de Psicología de la Universidad Autónoma del Estado de México*, 10(19), 28-46.
- Betancourt-Ocampo, D., Cervantes-Monteagudo, P., Gelabert-Huazano, A., Ruíz-Viquez-González, M. C. y Sánchez-Martínez, S. (2022). Desarrollo de una escala para evaluar el uso problemático de teléfono celular. *El Psicólogo Anáhuac*, 22, 51-63.
- Dania, C. y Marchisio, S. (2013). Modalidades de percepción sensorial de estudiantes de ingeniería en sistemas de información. *Invenio*, 17(31-32), 215-228.
- Egaña, M. L. D., Revuelta, M. J. C. y González, P. G. (2019). Medición de los Estilos de Aprendizaje: Análisis de las Herramientas más Utilizadas. En F. J. Murillo y C. Martínez-Garrido (Eds.), *Actas del XIX Congreso Internacional de Investigación Educativa Volumen III. Diagnóstico y evaluación educativa* (pp. 84-90). Editorial Asociación Interuniversitaria de Investigación Pedagógica.
- Esquivel-Gámez, I., Guerrero-Posadas, M. y Berthely-Barrios, J. C. (2024a). Adicción al teléfono inteligente, inteligencia fluida y memoria operativa en estudiantes mexicanos. *Apertura*, 16(1), 6-21. <http://doi.org/10.32870/Ap.v16n1.2470>
- Esquivel-Gámez, I., Guerrero-Posadas, M., Berthely-Barrios, J. C., & Vázquez-Ariza, J. L. (2024b). Assessing Smartphone Addiction among Mexican Students: Insights, Implications, and Interventions in the Era of Mobile Learning and Virtual Environments. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 18(15), 115-128. <https://doi.org/10.3991/ijim.v18i15.46933>
- Fernández, E. & Narváez, O. (2021). The Learning Styles of Pre-service Teachers. *CIEX Journal*, (13), 31-41.
- Fleming, N. D. (2012). Facts, Fallacies and Myths: VARK and Learning Preferences. [En línea]. Disponible en: <http://vark-learn.com/wp-content/uploads/2014/08/Some-Facts-About-VARK.pdf>. Fecha de consulta: 2 de octubre de 2023.
- Fleming, N. D. & Mills, C. (1992). Not another inventory, rather a catalyst for reflection. *To Improve the Academy*, 11(1), 137-155.
- Fuentes-Mejía, J. L., Fuquen-Giral, L. E. y Martínez-Avilés, D. A. (2018). Relación entre canal perceptual, habilidad cognitiva y desempeño académico en los programas de pregrado de la Fundación Universitaria Los Libertadores. (Tesis de maestría, Fundación Universitaria Los Libertadores). [En línea]. Disponible en: <https://repository.libertadores.edu.co/server/api/core/bitstreams/823b1456-45fa-4918-bc78-8bf809afbb16/content> Fecha de consulta: 14 de agosto de 2024.
- García-Santillán, A. y Escalera-Chávez, M. E. (2020). Adicción hacia el teléfono móvil en estudiantes de nivel medio superior. ¿Cómo es el comportamiento por género? *Acta de Investigación Psicológica*, 10(3), 54-65. <https://doi.org/10.22201/fpsi.20074719e.2020.3.358>
- García-Santillán, A., Escalera-Chávez, M. E., & Molchanova, V. S. (2022). Addiction toward Smartphone on college students, during the contingency derived from COVID-19. *International Journal of Media and Information Literacy*, 7(1), 110-117.
- Gómez-García, I. (2018). Aproximaciones al uso de teléfonos inteligentes entre los estudiantes de licenciatura de la Universidad Iberoamericana León. *EPIKEIA. Revista del Departamento de Ciencias Sociales y Humanidades*. <https://repositorio.ibe-roleon.mx/server/api/core/bitstreams/98cab324-106c-47ba-ae41-8cd435112789/content>.
- Guzmán-Cortés, J. A., Sánchez-Betancourt, J. T.,

- Meneses-López, N., Feliciano-Hernández, V. y Ruiz-Reyes, V. (2022). Diferencias en la atención sostenida en jóvenes universitarios con distintos niveles de uso de smartphone. *Interdisciplinaria*, 39(2), 23-36. <https://doi.org/10.16888/interd.2022.39.2.2>
- Hamamura, T., Kobayashi, N., Oka, T., Kawashima, I., Sakai, Y., Tanaka, S. C., & Honjo, M. (2023). Validity, reliability, and correlates of the Smartphone Addiction Scale-Short Version among Japanese adults. *BMC Psychology*, 11(1), 78. <https://doi.org/10.1186/s40359-023-01074-5>
- Harris, B., McCredie, M., & Fields, S. (2020). Examining the psychometric properties of the smartphone addiction scale and its short version for use with emerging adults in the US. *Computers in Human Behavior Reports*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2020.100011>
- Jiménez, J. L., Islas, R. M., Jiménez, J. D. y Pérez, E. (2019). Identificación de Estilos de Aprendizaje en Estudiantes de Odontología en México mediante el Modelo VARK. *Revista de Educación en Ciencias de la Salud*, 16(1), 1.
- Koepsell, D. R. y Ruiz-de-Chávez, M. H. (2015). *Ética de la investigación, integridad científica*. Comisión Nacional de Bioética/Secretaría de Salud. [En línea]. Disponible en: [https://www.conbioetica-mexico.saludgob.mx/descargas/pdf/Libro\\_Etica\\_de\\_la\\_Investigacion\\_gratuito.pdf](https://www.conbioetica-mexico.saludgob.mx/descargas/pdf/Libro_Etica_de_la_Investigacion_gratuito.pdf). Fecha de consulta: 14 de noviembre de 2024.
- Kwon, M., Kim, D. J., Cho, H., & Yang, S. (2013). The smartphone addiction scale: development and validation of a short version for adolescents. *PLoS One*, 8(12), e83558. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083558>
- Lavín-Zatarain, S., Zaldívar-Colado, A., Rodelo-Moreno, J. A. y Zaldívar-Martínez, J. J. (2019). Utilización del smartphone por estudiantes del nivel superior. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información: RITI*, 7(14), 89-97. <https://doi.org/10.36825/RITI.07.14.008>
- Leite, W. L., Svinicki, M., & Shi, Y. (2010). Attempted validation of the scores of the VARK: Learning styles inventory with multitrait-multimethod confirmatory factor analysis models. *Educational and Psychological Measurement*, 70(2), 323-339. <https://doi.org/10.1177/0013164409344507>
- Lopez-Fernández, O. (2017). Short version of the Smartphone Addiction Scale adapted to Spanish and French: Towards a cross-cultural research in problematic mobile phone use. *Addictive Behaviors*, 64, 275-280. <http://doi.org/10.1016/j.addbeh.2015.11.013>
- Lorenzo-Seva, U. & Ferrando, P. J. (2021). MSA: The forgotten index for identifying inappropriate items before computing exploratory item factor analysis. *Methodology*, 17(4), 296-306. <https://doi.org/10.5964/meth.7185>
- Loria, M. D. L. P. (2022). Dependencia al Smartphone, impulsividad y riesgo suicida en estudiantes universitarios de Yucatán México. *Informació Psicològica*, (123), 39-54. <http://doi.org/10.14635/IPSIC.1925>
- Medina-Morales, G. D. C. y Veytia-Bucheli, M. G. (2022). El impacto de la adicción al celular o nomofobia en estudiantes universitarios: caso de dos universidades mexicanas. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(1), 2123-2138. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i1.1639](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1639)
- Nooripour, R., Ghanbari, N., Mozaffari, N., Hosseinian, S., Carl-Lavie, J. O., & Hosseini, S. R. (2022). Self-Escapism among Iranian Girl Adolescents: Validity and Reliability of Persian Translation Scale. *Research Square*, 1-18. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2037372/v1>
- Olmedo-Hernández, I. J., Denis-Rodríguez, E., Barradas-Alarcón, M. E., Villegas-Domínguez, J. E. y Denis-Rodríguez, P. B. (2019). Agresividad y conducta antisocial en individuos con dependencia al teléfono móvil: un posible factor criminogénico. *Horizonte Médico (Lima)*, 19(3), 12-19. <http://doi.org/10.24265/horizmed.2019.v19n3.03>
- Olvera, G. N., Hernández, L. H. y Bringas, C. F. (2023). Estilos de enseñanza y aprendizaje en la deserción escolar de un programa académico universitario. *Orkopata. Revista de Lingüística, Literatura y Arte*, 2(2), 17-26. <https://doi.org/10.35622/jro.2023.02.002>
- Ortega-Torres, E., Solaz-Portolés, J. J. y Sanjosé-López, V. (2020). Preferências Sensoriais Vark De Alunos De Ensino Médio Na Aprendizagem De Ciências: Eles São Confiáveis? *Periódico Tchê Química*, 17(36).
- Pérez-Caballero, N. M. y Solis-Centeno, K. D. C. (2011). Nivel de uso del teléfono móvil y ansiedad en estudiantes de Psicología. UNAN-León, el periodo comprendido marzo-octubre 2011. [En línea]. Disponible en: <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/6045/1/223108.pdf>. Fecha de

consulta: 15 de octubre de 2023.

Pérez-Rodríguez, V. (2024). *El impacto de las nuevas tecnologías en la concentración de los alumnos*. UNIR. [En línea]. Disponible en: <https://www.unir.net/revista/educacion/impacto-nuevas-tecnologias-concentracion-alumnos/>. Fecha de consulta: 14 de noviembre de 2024.

Pinto-Loria, M. L. (2022). Dependencia al smartphone, impulsividad y riesgo suicida en estudiantes universitarios de Yucatán México. *Informació Psicològica*, (123), 39-54. <https://doi.org/10.14635/IPSI C.1925>

Pizarro, I. F. (2021). Los estilos de aprendizaje VARK en aula virtual universitaria; una herramienta para la mejora del rendimiento académico. RECIE. *Revista Electrónica Científica de Investigación Educativa*, 5(2), 221-234. <https://doi.org/10.33010/reciev5i2.1037>

Romero-Amado, J. (2020). Aproximación al consumo cultural de estudiantes universitarios de economía en Puebla, México. *Ultima Década*, 28(53), 210-234. <http://doi.org/10.4067/S0718-22362020000100210>

Sabater, V. (2023). *El sistema de recompensa del cerebro: neurobiología de la motivación*. La Mente es Maravillosa. <https://lamenteesmaravillosa.com/sistema-recompensa-cerebro/>. Fecha de consulta: 14 de noviembre de 2024.

Salud del adolescente (s.f.). Salud del adolescente. [En línea]. Disponible en: [https://www.who.int/health-topics/adolescent-health#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/adolescent-health#tab=tab_1). Fecha de consulta: 30 de octubre de 2023.

Sarmiento, M. A., González, M. C. y Rosado, J. F. C. (2021). Desarrollo de estrategias de enseñanza de TIC comprendiendo estilos de aprendizaje en el nivel medio superior. En E. Serna (Ed.), *Revolución en la formación y la capacitación para el siglo XXI* (pp. 49-56). Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Servidio, R., Griffiths, M. D., Di-Nuovo, S., Sinatra, M., & Monacis, L. (2023). Further exploration of the psychometric properties of the revised version of the Italian Smartphone Addiction Scale–Short Version (SAS-SV). *Current Psychology*, 42(31), 27245-27258. <https://doi.org/10.1007/s12144-022-03852-y>

Torres-Salazar, Q., Ramírez-Gurrola, A., Castañón-Alvarado, M., Aroña-Campos, A., Betancourt-Araujo, A., Carrillo-Cisneros, M. F., López-Molina,

C., Medina-Rosales, J. G. y de-la-Cruz, B. C. (2018). Asociación entre nomofobia e indicadores de inteligencia en estudiantes de educación superior. *Revista Internacional de Investigación en Adicciones*, 4(2), 19-24.

Torres, Z. Á. E., Sánchez, D. J. P., López, C. M. A. y Brito, C. T. D. J. (2023). Estilos de aprendizaje en estudiantes de la licenciatura en enfermería de tres instituciones de educación superior en México. *Horizonte de Enfermería*, 34(3), 594-609.

Vargas, L. F. H., Briones, F. Z., Morachis, M. A. R. y Carrasco, J. L. A. (2023). Caracterización y análisis del aprendizaje reflexivo en los estudiantes del tipo superior en México. *Revista IPSUMTEC*, 6(7), 59-68.

Vergara-Torres, A. P., Juvera-Portilla, J. L., Ceballos-Gurrola, O. y Zamarripa, J. (2020). Pokémon GO y su relación con la actividad física, orientación espacial y socialización en usuarios mexicanos. *Retos: Nuevas Tendencias en Educación Física, Deporte y Recreación*, (38), 727-732.

Wong, J. S. & Chin, K. C. (2018). Reliability of the VARK questionnaire in Chinese nursing undergraduates. *US-China Education Review*, 8(8), 332-340. <https://doi.org/10.17265/2161-623X/2018.08.002>

Zhao, H., Rafik-Galea, S., Fitriana, M., & Song, T. J. (2022). Translation and psychometric evaluation of smartphone addiction scale—short version (SAS-SV) among Chinese college students. *PLoS One*, 17(11), e0278092. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278092>



Puerto de Tánger-Med, ubicado en la región norte de Marruecos  
Imagen tomada de: Canva educativo

# Estudios sobre el costo del impacto por el incremento en el nivel del mar en los puertos y las metodologías empleadas para su cálculo: una revisión sistemática

## Studies on the economic impact of sea-level rise on ports and the methodologies used for its calculation: a systematic review

Luis Jesús Rodríguez-Aguilar<sup>1\*</sup>, María Cristina Garza-Lagler<sup>2</sup>, Violeta Zetzangari Fernández-Díaz<sup>3</sup>

### RESUMEN

Los puertos son esenciales para el crecimiento económico de un país por sus actividades comerciales y la creación de empleos, sin embargo, debido a su ubicación geográfica son vulnerables a inundaciones, con un mayor impacto en los últimos años, derivado del derretimiento de las capas de hielo de los glaciares y el aumento de la temperatura en los océanos, que son los principales efectos asociados al cambio climático que han contribuido al incremento en el nivel del mar (INM). El objetivo del presente trabajo fue identificar y caracterizar las metodologías empleadas, a nivel mundial, para calcular los costos por el INM en los puertos con la finalidad de ofrecer una aproximación de las propuestas metodológicas existentes para abordar este importante efecto del cambio climático. Para el desarrollo del trabajo, se dio seguimiento al listado sugerido en el Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), además se procedió con un análisis de contenido. Los costos que se estimaron en los estudios variaron significativamente desde unos millones hasta miles de millones de dólares, siendo en su mayoría acciones de adaptación, seguidas de los aspectos económicos, rentabilidad y relación costo-beneficio. Es conveniente transitar de estrategias aisladas y particulares a una propuesta metodológica global y estandarizada que permita afrontar el riesgo de inundación que se considere posiblemente inevitable ante los efectos del cambio climático. La operatividad de los puertos frente al INM dependerá en gran medida de una adecuada estimación de inversión necesaria para afrontarla, mediante proyecciones climáticas estandarizadas, evaluando de forma global el costo que implica, para garantizar que la inversión en infraestructuras portuarias sea eficaz.

**PALABRAS CLAVE:** cambio climático, incremento en el nivel del mar, puertos, metodología de costos, PRISMA.

### ABSTRACT

Ports are essential for a country's economic growth because of their commercial activities and job creation. However, their geographic location makes them vulnerable to flooding, with a greater impact in recent years due to the melting of glacier ice sheets and rising ocean temperatures, which were the main effects associated with climate change that have contributed to sea-level rise (SLR). The objective of this work was to identify and characterize the methodologies employed, globally, to calculate the costs of SLR in ports with the aim of providing an overview of existing methodological approaches to address this important climate change effect. For the development of this work, the suggested list in the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) was followed, and a content analysis was also conducted. The costs estimated in the studies varied significantly, ranging from millions to billions of dollars, with the majority focusing on adaptation measures, followed by economic aspects, cost-effectiveness and cost-benefit analysis. It is advisable to shift from isolated and specific strategies to a standardized global methodological approach that can address the potentially inevitable risk of flooding due to the effects of climate change. The operability of ports in the face of SLR will largely depend on accurately estimating the necessary investment to confront it, through standardized climate projections, evaluating the global cost involved, to ensure that investments in port infrastructure are effective.

**KEYWORDS:** climate change, sea-level rise, ports, cost methodology, PRISMA.

\*Correspondencia: rodriguez.dmayd@gmail.com/ Fecha de recepción: 4 de marzo de 2024/ Fecha de aceptación: 17 de septiembre de 2024/ Fecha de publicación: 2 de octubre de 2024.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana, núm. 3917, Fracc. Playitas, Ensenada, Baja California, México, C. P. 22860. <sup>2</sup>Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. (CIAD), Coordinación de Desarrollo Regional, Hermosillo, Sonora, México, C. P. 83304. <sup>3</sup>Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, Baja California, México, C. P. 22860.

## INTRODUCCIÓN

Los puertos son considerados infraestructuras que actúan como puertas de entrada al comercio mundial (Munim y Schramm, 2018). Además, son esenciales para el crecimiento económico de un país por sus actividades comerciales y la creación de empleos (Mudronja y col., 2020; Portillo y col., 2022). Las importaciones y exportaciones que se llevan a cabo en esos sitios incluyen el intercambio internacional de productos agrícolas, pesqueros y metálicos, así como artículos electrónicos, textiles y alimenticios, entre otros (Verschuur y col., 2022).

Según la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, por sus siglas en inglés: United Nations Conference on Trade and Development) (UNCTAD, 2022), el transporte marítimo constituye la columna vertebral del comercio internacional, debido a que más del 80 % del volumen total de mercancías a nivel mundial se moviliza por esta vía, siendo crucial para la economía de las regiones costeras. Por otra parte, en los puertos también se encuentran embarcaciones pesqueras y recreativas que son vitales para la industria alimenticia y turística, las cuales logran crear beneficios económicos y sociales para las comunidades locales (Kontogianni y col., 2018).

A nivel mundial, el 94.8 % de los puertos están expuestos a más de un peligro natural (Verschuur y col., 2023) que se suma al constante incremento en el nivel del mar (INM) (Taherkhani y col., 2020; McEvoy y col., 2021; Tebaldi y col., 2021). Las áreas costeras están constantemente expuestas a una variedad de fenómenos naturales como mareas, maremotos, movimientos de tierra (terremotos), tsunamis, mareas de leva, huracanes e inundaciones fluviales (Haigh y col., 2016; Kirezci y col., 2020). Estos eventos no solo provocan daños inmediatos, sino que también generan efectos a largo plazo en la infraestructura portuaria (Sierra, 2019). Por su ubicación geográfica, los puertos son vulnerables a inundaciones (Reyes-Bonilla y col., 2020; Ribeiro y col., 2023).

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés: Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC, 2023), se estima que, para finales de este siglo, el nivel del mar podría alcanzar hasta los 1.01 m, y con escenarios más extremos de INM, podría llegar hasta los 1.80 m, lo que generaría graves inundaciones en diversos lugares del planeta (Jevrejeva y col., 2014). En los puertos, las inundaciones de origen marino son unas de las principales amenazas para su infraestructura (Nazarnia y col., 2020; Izaguirre y col., 2021). Una inundación puede ocasionar la interrupción de las actividades comerciales portuarias y daños a la propiedad de las terminales marítimas (Brown y col., 2021; Amer, 2024).

En el sexto informe de evaluación (AR6) del IPCC (2022), se expuso que el INM continuará amenazando a los asentamientos costeros de varios países durante las próximas décadas. Este fenómeno es principalmente atribuible al derretimiento acelerado de las capas de hielo de los glaciares, así como al aumento de la temperatura en los océanos. Por lo tanto, las zonas costeras bajas serán las más afectadas y en donde exista infraestructura situada en primera línea de costa (Asariotis y col., 2018; Ehsan y col., 2019). Por ejemplo, en México, ante un INM de 1 m y 3 m, se estima que, entre el 1 % y el 2.5 % de la superficie del territorio insular del país quedaría completamente inundada (PNUD-INECC, 2016).

Ante la creciente amenaza del INM en diversas regiones del mundo, se ha llevado a cabo una mayor inversión en estrategias de adaptación costera (Haasnoot y col., 2019). El INM no solo implica costos significativos para la adaptación y protección de infraestructuras, sino que también puede tener un impacto sustancial en la cadena de suministro de mercancías entre distintos países (Becker y col., 2017). Una práctica común para mitigar los impactos negativos de las inundaciones en la infraestructura portuaria, ha sido la implementación de estructuras de defensa. De acuerdo

con Galiatsatou y col. (2018), estas estructuras incluyen diques, rompeolas y barreras marítimas que son diseñadas para proteger las áreas costeras de las olas y mareas.

La infraestructura portuaria es crucial para el comercio global y enfrenta crecientes demandas y desafíos de adaptación, los cuales se estiman podrían ascender a miles de millones de dólares (Aerts y col., 2018). Según Hanson y Nicholls (2020), se proyecta que, para el año 2050, los costos globales de inversión para la adaptación ante el INM y la construcción de nuevas áreas portuarias serán de entre 223 000 a 768 000 millones de dólares.

Un ejemplo para el año 2100 es el puerto de Tánger-Med, ubicado en la región norte de Marruecos, en donde se identificó que los costos de adaptación excederían aproximadamente los 42 millones de dólares con un escenario de INM de 1.8 m. Además, por la inoperatividad, se afectaría el movimiento de 1.97 millones de contenedores y 19.9 millones de Toneladas de hidrocarburos, lo que podría generar aumentos significativos en los costos de transporte y en los precios de los productos (Jebbad y col., 2022).

Algunos trabajos que anteceden a la presente investigación muestran que, desde 1990, se manifiesta la necesidad de estudiar el INM y sus efectos, tanto en el medio ambiente como en la economía de varios países para determinar las zonas costeras vulnerables y hacer frente al cambio climático (IPCC, 1992). En América, una de las primeras publicaciones sobre la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura portuaria y los costos asociados al impacto del INM, la elaboró Sainzar (1997), en la costa de Montevideo en Uruguay. En esa investigación se calculó que los costos de adaptación asociados a la construcción de un rompeolas alcanzarían varios miles de dólares.

Dos años después, en África, específicamente en Egipto, El-Raey y col. (1999), aplicaron una metodología que comprende la evaluación de las estrategias de adaptación para estimar las

pérdidas socioeconómicas ante una inundación. Años más tarde, en Europa, Hallegatte y col. (2011), estimaron los impactos del cambio climático mediante una evaluación de los efectos económicos directos e indirectos en la producción, reconstrucción y los beneficios de la inversión para reforzar las defensas marítimas y sus implicaciones económicas en la ciudad portuaria de Copenhague, la capital de Dinamarca.

De acuerdo con Messner y col. (2013), con el transcurso del tiempo ha sido necesario elaborar y/o fortalecer metodologías consistentes para evaluar las consecuencias de una inundación portuaria mediante un análisis cuantitativo de los costos. Las metodologías constituyen herramientas útiles para aproximar los impactos monetarios potenciales del INM en la operatividad portuaria, ya que permiten diseñar e implementar las vías de adaptación ante una inundación (Gracia y col., 2019) y, en consecuencia, ayudan a consolidar los planes para la protección portuaria (Hoshino y col., 2016; Sriver y col., 2018). Sin embargo, en la actualidad, las publicaciones científicas que se enfocan específicamente para calcular los daños económicos del INM en los puertos no son abundantes, por lo que es una necesidad urgente identificar y estudiar sus rutas metodológicas (Portillo y col., 2022). Según Bosello y De-Cian (2014), para cuantificar los costos de los daños por las inundaciones costeras en los puertos, es esencial una comprensión detallada de las metodologías aplicadas para evitar los posibles daños a la infraestructura portuaria, como también la interrupción de las actividades comerciales (Zviely y col., 2015).

El objetivo del presente trabajo fue identificar y caracterizar las metodologías empleadas, a nivel mundial, para calcular los costos por el INM en los puertos, con la finalidad de ofrecer a los analistas, tomadores de decisiones y a la comunidad científica, una aproximación de las propuestas metodológicas existentes para abordar uno de los efectos del cambio climático.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se partió de una revisión sistemática de la literatura especializada siguiendo la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), debido a que permite evaluar los estudios de forma estructurada (Page y col., 2021). En el proceso de recopilación de información, solamente se incluyeron publicaciones de revistas científicas en inglés y español, en las cuales se desarrolló y/o aplicó una metodología para calcular los costos por el INM en los puertos.

Se tomaron en cuenta publicaciones de enero 1990 hasta agosto 2023, debido a que el Primer Informe de Evaluación del IPCC (AR1), en donde se presenta una evaluación de los efectos del INM, fue publicado en 1990. Se excluyeron los documentos que, aunque abordaban el INM, no presentaban una metodología para calcular los costos por su impacto en los puertos, y por lo cual, no contribuían al objetivo de esta investigación.

Las bases de datos que se utilizaron en la búsqueda de información fueron Scopus y Web of Science. La primera contiene referencias bibliográficas con una temática multidisciplinaria en materia de ingeniería, economía y ambiente, entre otras, fundamentales para el análisis que procura el tema de la presente investigación. En cuanto a Web of Science, además de abarcar aspectos de ingeniería también comprende temas relacionados con las ciencias sociales, humanidades y tecnológicas.

En la búsqueda bibliográfica se utilizó un conjunto de palabras para generar los registros,

mediante una combinación de los términos de búsqueda en inglés: “port”, “cost”, “sea level rise” y “methodology”. Y al descriptor booleano “AND”. La combinación de términos que arrojó un mayor número de publicaciones, en las dos bases de datos fueron: “port”, “cost” y “sea level rise” (Tabla 1). En la barra de búsqueda de Scopus, las palabras se escribieron entre comillas para un mejor resultado.

Una vez identificadas las publicaciones en las bases de datos, se realizó el proceso de selección de los estudios. Como primer aspecto se detectaron aquellos registros duplicados para ser descartados. Posteriormente, se llevó a cabo un cribado por medio de la lectura de los resúmenes para excluir aquellos que no estaban relacionados con el tema de esta investigación. A continuación, se examinó el texto completo de las publicaciones científicas para determinar si daban respuesta a la pregunta de la investigación relacionada con las metodologías empleadas a nivel mundial para calcular los costos por el impacto del INM en los puertos. Finalmente, se obtuvieron los registros definitivos que fueron organizados de acuerdo con su origen y periodo de estudio.

Con los registros se realizó un análisis de contenido, el cual es una técnica destinada a formular conclusiones a partir de ciertos datos para que sean reproducibles y válidos, haciendo énfasis en tres aspectos importantes, acorde a Krippendorff (1990): 1) deben quedar claros los datos que se analizan, 2) establecer la manera en que se van a definir y 3) precisar la población de donde se extrae la información.

■ **Tabla 1. Descriptores de búsqueda y sus resultados.**

Table 1. Search equations and their results.

Búsqueda	Palabras de búsqueda	Resultado
<b>Scopus</b>		
1	“Port” AND “Cost” AND “Sea level rise” AND “Methodology”	10
2	“Port” AND “Cost” AND “Sea level rise”	54
<b>Web of Science</b>		
1	Port AND Cost AND Sea level rise AND Methodology	7
2	Port AND Cost AND Sea level rise	62

De esta forma, se identificaron los elementos que se describen en las metodologías aplicadas y se analizaron los aspectos más importantes para la investigación. Es importante destacar que la información obtenida se clasificó en tres tipos de categorías analíticas: métodos utilizados para calcular los costos, tipos de costos estimados y evaluaciones realizadas en las investigaciones. Dichas categorías surgen del análisis de contenido resultante de la revisión de literatura sobre el cálculo de los costos por el INM en los puertos, cuyas definiciones, para fines de esta investigación, se estructuraron acorde a lo mencionado por los autores de cada uno de los artículos.

La primera categoría abarcó todo el contenido relacionado con los procedimientos orientados a recopilar, examinar y analizar la información por medio del uso de diferentes modelos o herramientas (Tabla 2). La categoría de los tipos de costos estimados comprendió la información en materia económica que, acorde a los estudios, se generan por el impacto del INM. Finalmente, la última categoría destaca el propósito del análisis que se llevó a cabo en cada una de las investigaciones. Este propósito abarca la identificación de cada tipo de evaluación que fue realizada por los diferentes autores.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Existe una reducida evidencia científica del impacto económico de las INM en los puertos, ya que solamente 16 publicaciones (12.03 % del total de registros identificados inicialmente) abordan esta problemática (Figura 1).

### Métodos utilizados en los estudios y tipos de costos estimados

En las 16 publicaciones se utilizaron diferentes métodos agrupados como estadísticos (50 %), probabilísticos (37.50 %), empíricos (25 %), analíticos (12.50 %) y numéricos (6.25 %).

También se establecieron los tipos de costos que se estimaron en las investigaciones, los cuales fueron: adaptación, económicos, rentabilidad y costo-beneficio (Tabla 3). La mayo-

ría de las investigaciones (87.50 %) elaboraron el cálculo de los costos de adaptación, en tanto que, solo el 25 % realizó el cálculo de los costos económicos. Esto pone de relieve la importancia de los análisis cuantitativos para comprender y gestionar los costos asociados con los efectos del INM. A pesar de que la rentabilidad y el costo-beneficio se presentaron con menor frecuencia, con un 18.75 % y 6.25 %, respectivamente, estos fueron cruciales para determinar la viabilidad en la inversión y la eficacia para la toma de decisiones.

### Distribución geográfica de las investigaciones

De manera general, un factor distintivo encontrado en las publicaciones subyace en el continente donde los autores realizaron las investigaciones (Figura 2 y Tabla 4). Durante el periodo de 1990 a 1999, solamente se publicaron 2 estudios en América (Uruguay: 1997) y África (Egipto: 1999). De 2000 a 2009, no se registraron publicaciones que abordaran el tema. Sin embargo, de 2010 a 2019 se identificó un aumento significativo en la cantidad de publicaciones con un total de 11, distribuidas en los continentes de Europa (Dinamarca, Grecia, España y Francia), Asia (Japón e Israel y puertos principales) y América (Estados Unidos). Este aumento reflejó una mayor preocupación global sobre los impactos del cambio climático, especialmente en las infraestructuras estratégicas para el comercio internacional, como los puertos. Finalmente, de 2020 a 2023, solamente se identificaron 3 estudios, uno a nivel mundial, y otros dos en África (Marruecos) y América (Chile).

### Evaluaciones realizadas

Las publicaciones se dividen en tres categorías, acorde a la revisión de contenido: vulnerabilidad, riesgo y financiera. La vulnerabilidad se expresa como el nivel de susceptibilidad al daño por un desastre debido a la falta de prevención o adaptación, ante un evento de origen marítimo (Saizar, 1997; El-Raey y col., 1999; Hallegatte y col., 2011; Aerts y col., 2018; Kontogianni y col., 2018; Sriviver y col., 2018; Sierra, 2019; Jebbad y col., 2022; Winckler y col., 2022).

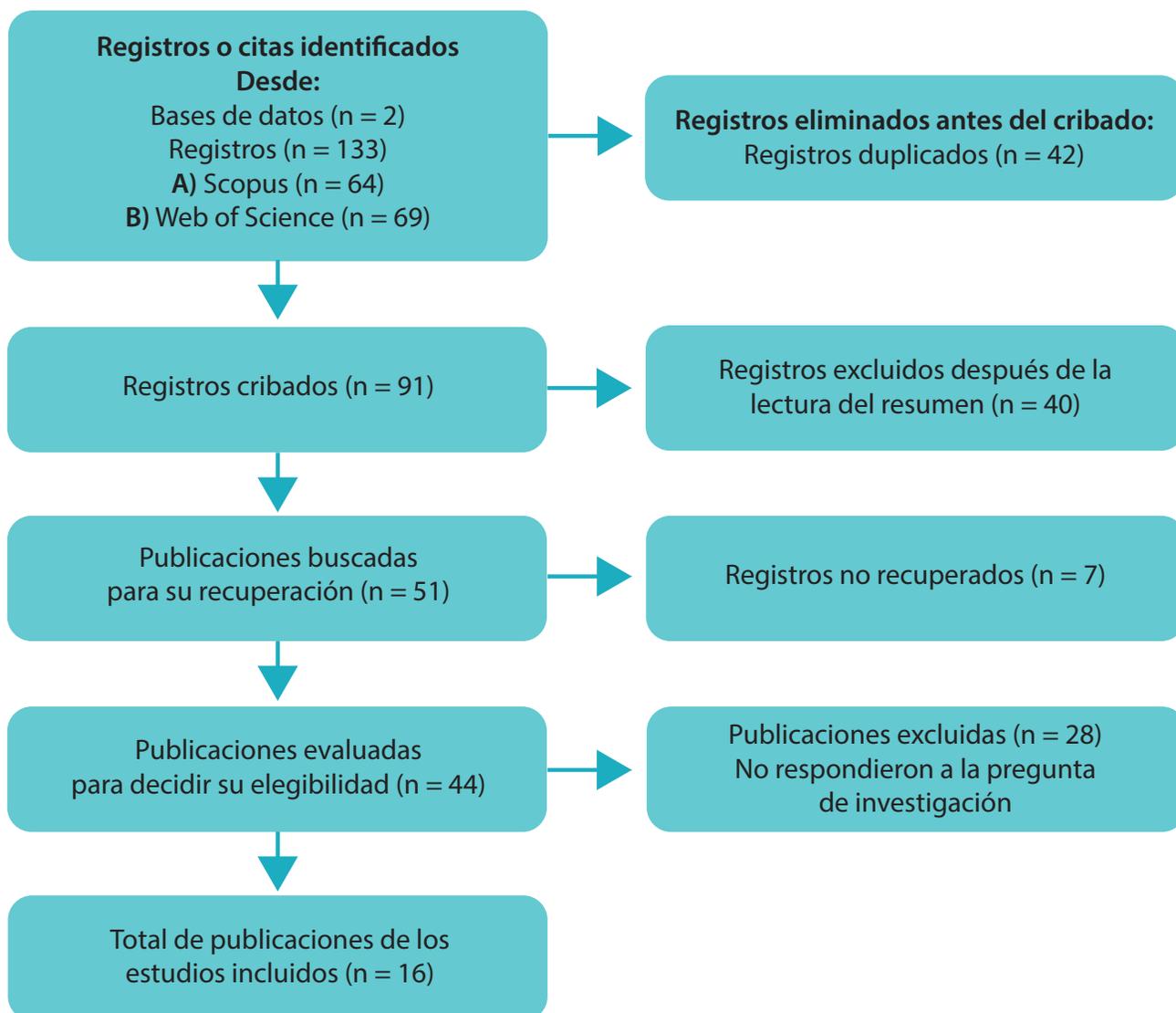
■ **Tabla 2. Modelos o herramientas utilizadas en los estudios.**

Table 2. Models or tools used in the studies.

Autor	Modelos o herramientas
Saizar (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regla de Brunn (1962) para estimar los impactos del INM</li> </ul>
El-Raey y col. (1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de criterios múltiples Evaluador de Simulación para la Adaptación (ASE, por sus siglas en inglés: Adaptation Simulation Evaluator)</li> <li>Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat de 1995</li> <li>Una matriz de decisiones para las medidas de adaptación</li> </ul>
Hallegatte y col. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo Regional Adaptativo de Entrada-Salida (ARIO, por sus siglas en inglés: Adaptive Regional Input-Output)</li> <li>Evaluación económica de los impactos directos e indirectos del INM</li> </ul>
Zviely y col. (2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo físico para calcular la restauración o extensión para estructuras marinas al tener en cuenta las propiedades físicas y ambientales de las estructuras marinas</li> <li>Para recopilar información se utilizaron entrevistas</li> </ul>
Hoshino y col. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Funciones de distribución de la probabilidad</li> </ul>
Becker y col. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo de puerto genérico (GenPort, por sus siglas en inglés: Generic Port) que se utiliza como base para estimar los costos de la elevación del terreno y la modernización de la infraestructura para disminuir los efectos del INM</li> <li>Base de datos de estimaciones de costos de construcción denominada RSMMeans</li> </ul>
DiSegni y col. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metodología de evaluación de daños que proporciona un marco físico para analizar la vulnerabilidad de los puertos y las marinas ante el INM</li> </ul>
Aerts y col. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se utilizó el sistema de modelado de tormentas costeras CoSMoS 3.0 del Servicio Geológico de los Estados Unidos</li> <li>En las condiciones regionales se aplicaron los modelos de onda anidada Delft3.D</li> </ul>
Galiatsatou y col. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estado límite último para el colapso del montículo de escombros del rompeolas</li> <li>Estado límite de servicio para la interrupción de las operaciones portuarias</li> </ul>
Kontogianni y col. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metodología del IPCC para evaluar la vulnerabilidad de las zonas costeras.</li> <li>Índice de vulnerabilidad climática que generalmente se obtiene mediante la combinación de diversos indicadores: físicos, sociales y económicos</li> <li>Para recopilar información se utilizaron entrevistas</li> </ul>
Sriver y col. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Método de decisiones robustas: Una herramienta desarrollada para suplir la falta de un proceso formal en el pensamiento ordenado y que es adaptable a la resolución de problemas en contextos de alta complejidad</li> </ul>
Yang y col. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo de toma de decisiones para la selección de las medidas de adaptación ante el cambio climático</li> <li>Modelo bayesiano de riesgos climáticos</li> <li>Herramienta denominada: Análisis de modos de falla y efectos (FMEA, por sus siglas en inglés: Failure Mode and Effect Analysis)</li> </ul>
Sierra (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ecuaciones de los métodos empíricos propuestos en el Manual Europeo de Sobreelevación (EurOtop, por sus siglas en inglés: European Overtopping)</li> </ul>
Hanson y Nicholls (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versión mejorada de la primera estimación de los costos globales de protección contra el INM, desarrollada por el Instituto Delft Hydraulics, al diferenciar entre mercancías transportadas por graneles y contenedores</li> <li>Modelo para el comercio a granel y para el área requerida de contenedores</li> <li>Se utilizaron los materiales criterios de diseño, incluidas las variaciones entre importación y exportación de su manejo y almacenamiento</li> </ul>

Continúa...

Jebbad y col. (2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distribución de Weibull del año 1951</li> <li>• Recomendaciones para el proyecto de las obras de atraque y amarre denominada ROM 20-11 de España</li> <li>• Análisis de la interrupción en el movimiento de mercancías y el tiempo de inoperatividad</li> </ul>
Winckler y col. (2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés: General Circulation Model)</li> <li>• Modelos de ondas locales con datos de INM de 20 GCM para diferentes periodos de retorno (Impactos en la infraestructura)</li> <li>• Análisis históricos del tiempo de inoperatividad</li> </ul>



Fuente: Modificado a partir de Page y col. (2021).

■ **Figura 1. Proceso de selección de las publicaciones científicas.**  
Figure 1. Selection process for scientific publication.

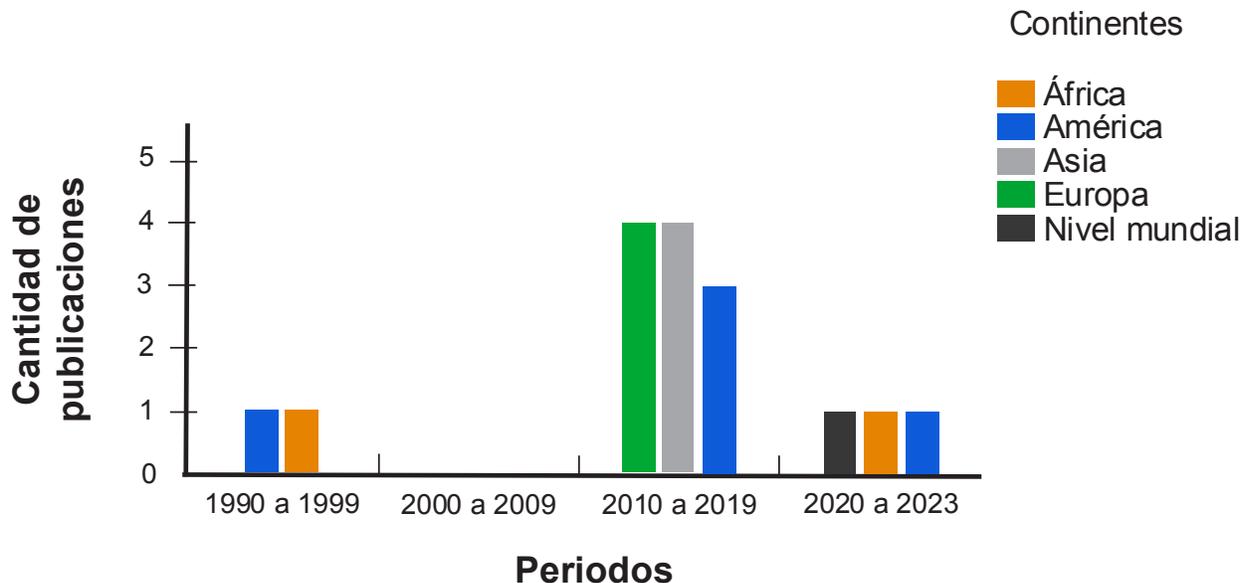
■ **Tabla 3. Tipos de métodos utilizados y costos estimados en los estudios.**  
 Table 3. Types of methods used and estimated costs in the studies.

Autores	Método utilizado					Costos estimados			
	Análítico	Empírico	Númérico	Estadístico	Probabilístico	Adaptación	Económico	Rentabilidad	Costo-Beneficio
Saizar (1997)				X		X		X	
El-Raey y col. (1999)				X		X			
Hallegatte y col. (2011)				X		X	X		
Zviely y col. (2015)				X		X			
Hoshino y col. (2016)					X	X	X		
Becker y col. (2017)		X				X			
DiSegni y col. (2017)					X	X			
Aerts y col. (2018)				X		X			
Galiatsatou y col. (2018)				X	X	X			
Kontogianni y col. (2018)	X	X				X		X	
Sriver y col. (2018)					X				X
Yang y col. (2018)	X		X			X		X	
Sierra (2019)		X				X			
Hanson y Nicholls (2020)				X		X			
Jebbad y col. (2022)					X	X	X		
Winckler y col. (2022)		X		X	X		X		
Porcentajes	12.50	25	6.25	50	37.50	87.50	25	18.75	6.25

El riesgo es descrito como el grado de incertidumbre de que ocurra un desastre marítimo en un momento determinado, el cual puede ocasionar pérdidas económicas. Este tipo de evaluación se enfoca en la probabilidad de ocurrencia de estos eventos y sus impactos potenciales. Su aplicación tiene como objetivo priorizar las acciones de mitigación y respuesta ante el INM (Hallegatte y col., 2011; Zviely y col., 2015; Hoshino y col., 2016; DiSegni y col., 2017; Aerts y col., 2018; Galiatsatou y col., 2018; Sriver y col., 2018; Yang y col., 2018; Winckler y col., 2022). En torno a la evaluación financiera, esta se expresó en los trabajos que estimaron una amplia definición de costos, como los de adaptación, económicos, costo-beneficio y la rentabilidad, la cual permitió la

estimación del impacto económico del INM en los puertos (Tabla 4).

En la Tabla 4, se proporcionó una visión amplia y comparativa de los costos por el impacto del INM proyectado para diferentes regiones y horizontes temporales. Uno de los aspectos más llamativos de los resultados es la marcada variabilidad en los costos que fueron estimados. Esta variabilidad no solo refleja las diferencias en la magnitud del INM esperado, sino también en las características socioeconómicas y geográficas de cada ubicación. Por ejemplo, el estudio de Saizar (1997) en Uruguay, se consideró un costo de entre 17 000 a 41 000 dólares para la construcción del rompeolas. En contraste, Becker y col. (2017)



■ **Figura 2. Distribución geográfica de las publicaciones.**  
 Figure 2. Geographical distribution of publications.

estimaron que la adaptación de 100 puertos costeros en Estados Unidos podría costar entre 57 000 y 78 000 millones de dólares, lo que subraya la diferencia en la escala de infraestructura y en las necesidades de adaptación entre las diferentes regiones.

La fluctuación de costos estimados también puede estar influenciada por las metodologías empleadas en cada estudio. Hallegatte y col. (2011) en Dinamarca, utilizaron modelos económicos específicos para estimar el impacto del INM, mientras que otros, como el de Hanson y Nicholls (2020), adoptaron un enfoque más amplio, que incluye proyecciones de costos a nivel global basadas en escenarios de cambio climático. La diversidad de enfoques metodológicos sugiere que las estimaciones de costos pueden estar sujetas a un grado significativo de incertidumbre, lo que destaca la importancia de utilizar múltiples escenarios y metodologías para capturar la gama completa de posibles impactos.

Otro factor importante en la variabilidad de los costos es el escenario de INM considerado

y el horizonte temporal. La mayoría de los estudios proyectaron escenarios para el año 2100, con un INM de entre 0.30 m y 2.0 m, por lo que los costos fueron menores. Sin embargo, El Raey y col. (1999) y Hallegatte y col. (2011), estimaron costos significativamente más altos. La variación de costos se debe a que los efectos del cambio climático, como el INM, tienden a intensificarse con el tiempo, lo que aumenta tanto la magnitud de los impactos como los costos asociados a su mitigación y adaptación. Por ejemplo, El-Raey y col. (1999) en Egipto, calcularon un costo de entre 2 000 a 4 000 millones de dólares para un INM de 0.50 m en 2050 y 1.0 m en 2100, demostrando que los costos aumentan con el tiempo y con la severidad del escenario considerado. Un caso particular, es el de Hoshino y col. (2016), en Japón, quienes utilizaron un INM de 1.90 m para el año 2100, y estimaron costos significativamente más altos, que la mayoría de los estudios con INM más bajos. En este caso, aproximadamente de 1 000 a 3 000 millones de dólares. Tiempo después Hanson y Nicholls (2020), mostraron costos muy por encima de todos los anteriores, pero

■ **Tabla 4. Análisis comparativo de los costos estimados.**  
 Table 4. Comparative analysis of estimated costs.

<b>Autores</b>	<b>Región</b>	<b>Escenario de INM</b>	<b>Costo estimado</b>	<b>Consideraciones</b>
Saizar (1997)	Uruguay	0.50 m para 2085 y 1.0 m para el año 2100	17 000 a 41 000 dólares	Construcción del rompeolas
El-Raey y col. (1999)	Egipto	0.50 m para el año 2050 y 1.0 m para el 2100	2 000 a 4 000 millones de dólares	Evaluación de los impactos potenciales y costos asociados ante el INM
Hallegatte y col. (2011)	Dinamarca	0.50 m a 1.0 m para el año 2100	Aproximadamente de 6 000 a 11 000 millones de dólares*	Construcción de diques y estimación de pérdidas
Zviely y col. (2015)	Israel	0.50 m y 1.0 m para el año 2100	200 a 500 millones de dólares	Renovación o ampliación de las estructuras marinas
Hoshino y col. (2016)	Japón	1.90 m para el año 2100	Aproximadamente de 1 000 a 3 000 millones de dólares*	La adaptación de diques antiguos y la construcción de nuevos diques
Becker y col. (2017)	100 puertos costeros, E.U.	0.60 m a 2.0 m para el año 2100	57 000 y 78 000 millones de dólares	Materiales necesarios y la mano de obra para la elevación de infraestructura
DiSegni y col. (2017)	Israel	0.50 m a 1.0 m para el año 2050	280 y 505 millones de dólares	Construcciones marinas en la costa sudeste del Mediterráneo
Aerts y col. (2018)	Áreas costeras del condado de Los Ángeles, E.U.	0.30 m a 2.0 m para el año 2100	4 300 y 6 400 millones de dólares	Incluyen construcción de diques y restauración de dunas
Galiatsatou y col. (2018)	Francia	0.40 m, 0.60 m y 1.0 m para el año 2100	Aproximadamente 9 millones de dólares*	Mejorar las estructuras de protección del rompeolas
Kontogianni y col. (2018)	47 puertos pesqueros y comerciales, Grecia	Datos del IPCC de la vulnerabilidad costera para el año 2100	Aproximadamente de 3 000 dólares a 5 millones de dólares*	Mantener la eficiencia y resistencia de los puertos para reducir la vulnerabilidad
Sriver y col. (2018)	Puerto de Los Angeles, E.U.	2.0 m para el año 2100	Se evaluó con relación a los parámetros del costo-beneficio	Mejorar o actualizar la infraestructura de protección

Continúa...

Yang y col. (2018)	14 principales puertos de contenedores, Asia	Los daños del INM y la marea de tormenta para menos de 1 año hasta más de 20 años	Se empleó el índice de la rentabilidad para generar resultados	Evaluación de riesgos y seleccionar las medidas de adaptación más rentables
Sierra (2019)	47 puertos catalanes, España	INM entre los 0.36 m y 1.80 m para diferentes periodos hasta el año 2100	Aproximadamente de 39 mil dólares a 3 millones de dólares*	La construcción o elevación del rompeolas
Hanson y Nicholls (2020)	Nivel mundial	Se analizaron los efectos del aumento de la temperatura global entre 2 °C y 4 °C con sus implicaciones en el INM para el año 2050	223 000 a 768 000 millones de dólares	Expansión y la adaptación de las infraestructuras portuarias ante el cambio climático
Jebbad y col. (2022)	Marruecos	1.8 m para el año 2100	Aproximadamente 42 millones de dólares*	Elevación de los muelles de cada terminal del puerto y la estimación debido a la inoperatividad
Winckler y col. (2022)	Chile	INM entre los 0.12 m a 2 m para diferentes periodos hasta el año 2100	2 a 38 millones de dólares	Evaluación de los costos económicos debido al tiempo de inoperatividad

\*Tasa de cambio de acuerdo al año de publicación.

en su estudio realizan cálculos a nivel mundial, y no en ubicaciones específicas (Tabla 4).

Con respecto a las estrategias de mitigación y adaptación que fueron propuestas en los diferentes estudios, las soluciones varían desde la construcción de nuevas infraestructuras, como diques y rompeolas, hasta la mejora o adaptación de infraestructuras existentes. En el caso de los estudios realizados en Israel por Zviely y col. (2015) y DiSegni y col. (2017) se destacó la importancia de la construcción, renovación o ampliación de las estructuras marinas como una medida clave para reducir los impactos del INM. Estas estrategias, aunque costosas, son esenciales para mantener la operatividad de los puertos y proteger las comunidades costeras de los efectos adversos del cambio climático.

La eficacia de estas estrategias depende en gran medida de la correcta evaluación de los

riesgos y de la implementación oportuna de las medidas de adaptación. En este sentido, el estudio de Yang y col. (2018) sobre los puertos de contenedores en Asia es especialmente relevante, ya que utiliza un índice de rentabilidad para seleccionar las medidas de adaptación más efectivas. Dicho enfoque cuantitativo no solo optimiza la asignación de recursos, sino que también asegura que las inversiones en adaptación generen el mayor retorno posible en términos de reducción de riesgos y protección de los activos.

Algunos estudios como el de Aerts y col. (2018) en Los Ángeles, Estados Unidos, recalcan la necesidad de combinar medidas estructurales, como la construcción de diques y con enfoques no estructurales, la restauración de dunas, para ofrecer una protección integral contra el INM. Esta combinación de estrategias sugiere que las soluciones más efectivas serán aquellas que integren una variedad de en-

foques, adaptados a las características específicas de cada puerto y región.

Los costos estimados para la adaptación por el INM tienen importantes implicaciones económicas y sociales. Los altos costos proyectados para algunos puertos, especialmente en países desarrollados, como por ejemplo en Estados Unidos, Dinamarca y Japón, indican que los recursos necesarios para la adaptación podrían ser elevados, lo que plantea desafíos para la financiación de estas medidas. Sin embargo, los beneficios de estas inversiones, en términos de reducción de riesgos y protección de la infraestructura crítica, son sustanciales y justifican los costos.

A través del paso del tiempo, la problemática del INM en los puertos ha sido multifacética, involucrando no solo el impacto físico y estructural sino también consideraciones económicas y de planificación a largo plazo para atender las necesidades de protección en cada país. Es relevante mencionar que en 2014

se presentó el quinto informe de evaluación del IPCC (AR5), el cual sigue siendo crucial debido que se recalcó la importancia de contar con una mejor evaluación de los costos ante los desastres naturales. Este informe impulsó la investigación sobre metodologías para disminuir los impactos del cambio climático a nivel mundial (IPCC, 2014). Además, la influencia de este informe es evidente en la concentración de publicaciones en esos años, ya que proporcionó un marco científico y una urgencia que catalizaron la investigación y la implementación de estrategias más robustas para enfrentar los desafíos del cambio climático.

Los métodos identificados en las publicaciones emergen como mecanismos fundamentales para el cálculo de los costos. Por lo tanto, son esenciales para generar información de gran utilidad para la toma de decisiones en el contexto de la gestión portuaria, sin embargo, según los autores cada uno tiene sus ventajas y limitaciones (Tabla 5). Es importante señalar que la combinación de varios métodos em-

■ **Tabla 5. Ventajas y limitaciones de los métodos empleados en los estudios.**

Table 5. Advantages and limitations of the methods used in the studies.

Características de su empleo	Ventajas	Limitaciones
<b>Analíticos</b>		
Evaluación de las causas de determinados fenómenos con el fin de conocer sus características generales y particulares mediante la aplicación de algoritmos	Ofrecen una comprensión detallada de los acontecimientos identificados y pueden mejorar la precisión de las estimaciones	Las fallas en su medición pueden afectar la validez de los resultados generados
<b>Empíricos</b>		
Permiten reunir información por medio de la observación científica de distintos fenómenos	Al emplear datos observacionales directos se puede aumentar la confiabilidad de las estimaciones en contextos específicos	Generalmente dependen de factores contextuales específicos, por lo cual, pueden no ser replicables en otros entornos
<b>Numéricos</b>		
Engloban las herramientas útiles para generar soluciones eficientes y prácticas en el diseño de ingeniería costera sobre problemas complejos que no pueden resolverse analíticamente	Contribuyen a enfrentar los problemas que analíticamente son demasiado difíciles de resolver al considerar múltiples variables dinámicas	Para su implementación se ocupan recursos computacionales específicos, esto puede suponer una barrera tecnológica para los usuarios

Continúa...

Estadísticos		
Se utilizan para analizar y recopilar datos por medio de técnicas estadísticas a fin de identificar, describir, estimar parámetros y establecer hipótesis a partir del uso de modelos o fórmulas matemáticas para resolver un problema	Permiten realizar estimaciones rápidas y de gran utilidad para la toma de decisiones	Su capacidad de detectar eventos extremos sin precedentes históricos podría ser insuficiente
Probabilísticos		
Estimar diferentes posibilidades, de acuerdo con una distribución de parámetros inciertos, con la finalidad de conocer su comportamiento en un determinado periodo mediante el uso de modelos matemáticos	Ayudan a modelar la incertidumbre mediante la elaboración de evaluaciones bajo diferentes condiciones climáticas futuras	Necesitan información detallada y de alta calidad para ser efectivos, lo que puede ser un desafío en algunas regiones

pleados en algunos de los estudios ofrece una perspectiva y fortaleza única que, cuando se integran, pueden proporcionar una comprensión más completa y robusta del fenómeno estudiado.

Cada tipo de costos tiene sus ventajas y limitaciones al momento de planear su implementación (Tabla 6). El análisis de los costos no solamente permite una mejor gestión de recursos, sino que también ayuda a optimizar

■ **Tabla 6. Ventajas y limitaciones de los tipos de costos.**  
 Table 6. Advantages and limitations of the types of costs.

Costos	Ventajas	Limitaciones
Adaptación		
Abarcan la construcción y mantenimiento de las estructuras de protección del puerto, con el propósito de reducir el riesgo de una inundación derivada del INM, así como también el desarrollo de nuevas áreas portuarias para enfrentar y adaptarse ante el cambio climático	Proporcionan una asignación eficiente de recursos y facilitan la aplicación de las medidas preventivas que pueden reducir de gran manera los daños	Las proyecciones a muy largo plazo pueden ser inciertas debido a la variabilidad climática y los cambios en el uso del suelo
Económicos		
Resultan debido al tiempo de inoperatividad o inactividad de un puerto por una inundación, lo que incluye pérdidas directas e indirectas en la economía	Permiten cuantificar los efectos directos e indirectos de la economía local y nacional e internacional	La estimación precisa puede ser muy compleja debido a la necesidad de utilizar múltiples variables económicas

Continúa...

Rentabilidad		
Rendimiento que se obtiene por la inversión realizada en un proyecto, lo cual facilita la aplicación racional de las medidas necesarias para la implementación de las estrategias de adaptación	Ayuda a estimar la eficiencia en el rendimiento de la inversión para la selección de proyectos que tienen un mayor retorno económico	Enfocarse en el rendimiento puede obstaculizar el análisis de las consecuencias sociales y ambientales de las inundaciones
Costo-beneficio		
Para respaldar y justificar las decisiones de inversión en materia de proyectos de infraestructura portuaria con la finalidad de mitigar los daños por el INM	Genera una visión integral de los impactos del INM y justifican la inversión en ámbitos sociales y ambientales, no solo económicos	Se necesitan datos detallados y precisos para ser efectivos al momento de implementar su análisis

la precisión en las estimaciones económicas, asegurando que las decisiones tomadas sean eficientes y sostenibles.

## CONCLUSIONES

El impacto económico del INM en los puertos se ha abordado poco en la literatura científica (solo el 12.03 % de los registros encontrados en las bases de datos correspondieron a esta temática) y se ha realizado mediante diferentes estrategias metodológicas analíticas, empíricas, numéricas, estadísticas y probabilísticas; cada una con características particulares y cuya adecuada implementación requiere un enfoque específico y contextualizado. Ante un problema que se considera grave e inminente como es el INM, es conveniente desarrollar y seguir metodologías específicas para cuantificar los costos asociados con las inundaciones provocadas por este fenómeno. Las estimaciones de los costos asociados con el INM variaron ampliamente, según las características socioeconómicas y geográficas de cada región, pero también debido a los diferentes escenarios considerados en las metodologías empleadas. Los tipos de costos, identificados como adaptación, económicos, rentabilidad y el costo-beneficio de infraestructu-

ras portuarias, destacaron la necesidad de establecer acciones oportunas para enfrentar el cambio climático. Por lo tanto, la capacidad de los puertos para mantener su operatividad frente al INM dependerá en gran medida de una adecuada estimación de costos. La implementación de los últimos avances en proyecciones climáticas y en la modelización económica, es vital para garantizar que las decisiones de inversión en infraestructuras portuarias sean eficaces. Esto requiere un compromiso continuo con la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías o enfoques que puedan mejorar la resiliencia de los puertos ante el INM y para ello, es esencial que los futuros estudios en este ámbito continúen refinando las metodologías existentes y el alcance de las investigaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Para la realización de esta investigación, Luis Jesús Rodríguez Aguilar agradece el apoyo por la Beca otorgada al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

## DECLARACIÓN DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflicto de interés alguno.

## REFERENCIAS

- Aerts, J. C., Barnard, P. L., Botzen, W., Grifman, P., Hart, J. F., De-Moel, H., Mann, A. N., de-Ruig, L. T., & Sadrpour, N. (2018). Pathways to resilience: adapting to sea level rise in Los Angeles. *Annals*

of the *New York Academy of Sciences*, 1427, 1-90. <https://doi.org/10.1111/nyas.13917>

Amer, R. (2024). Assessing vulnerability and enhancing resilience of port systems in southeast Texas facing sea-level rise. *Frontiers in Built Environment*, 10, 1369833. <https://www.doi.org/10.3389/fbuil.2024.1369833>

Asariotis, R., Benamara, H., & Mohos, V. (2018). Port Industry Survey on Climate Change Impacts and Adaptation. UNCTAD. Research Paper No. 18. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28176.66569>. Fecha de consulta: 21 de agosto de 2023.

Becker, A., Hippe, A., & Mclean, E. L. (2017). Cost and Materials Required to Retrofit US Seaports in Response to Sea Level Rise: A Thought Exercise for Climate Response. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(3),44. <https://doi.org/10.3390/jmse5030044>

Bosello, F., & De-Cian, E. (2014). Climate change, sea level rise, and coastal disasters. A review of modeling practices. *Energy Economics*, 46, 593-605. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.09.002>

Brown, S., Jenkins, K., Goodwin, P., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Tol, R. S. J., Jenkins, R., Warren, R., Nicholls, R. J., Jevrejeva, S., Sanchez, A., & Haigh, I. D. (2021). Global costs of protecting against sea-level rise at 1.5 to 4.0 °C. *Climatic Change*, 167, 4. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03130-z>

Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88, 117-130. <https://doi.org/10.1061/JWHEAU.0000252>

DiSegni, D. M., Bitan, M., & Zviely, D. (2017). Assessing the costs for adaptation of marine constructions to sea-level rise. *Journal of Environmental Planning and Management*, 60(11), 2056-2070. <https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1272441>

El-Raey, M. E., Dewidar, K., & El-Hattab, M. (1999). Adaptation to the Impacts of Sea Level Rise in Egypt. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4, 343-361. <https://doi.org/10.1023/A:1009684210570>

Ehsan, S., Begum, R. A., Nor, N. G. M., & Maulud, K. N. A. (2019). Current and potential impacts of sea level rise in the coastal areas of Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 228, 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/228/1/012023>

Galiatsatou P., Makris C., & Prinos P. (2018). Optimized Reliability Based Upgrading of Rubble Mound Breakwaters in a Changing Climate. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(3), 92. <https://doi.org/10.3390/jmse6030092>

Gracia, V., Sierra, J. P., Gómez, M., Pedrol, M., Sampé, S., García-León, M., & Gironella, X. (2019). Assessing the impact of sea level rise on port operability using LiDAR-derived digital elevation models. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111318. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111318>

Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., & Wood, R. M. (2011). Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. *Climatic Change*, 104, 113-137. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9978-3>

Haigh, I. D., Wadey, M. P., Wahl, T., Ozsoy, O., Nicholls, R. J., Brown, J. M., Horsburgh, K., & Gouldby, B. (2016). Spatial and temporal analysis of extreme sea level and storm surge events around the coastline of the UK. *Scientific Data*, 3, 160107. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.107>

Hanson, S. E. & Nicholls, R. J. (2020). Demand for Ports to 2050: Climate Policy, Growing Trade and the Impacts of Sea-Level Rise. *Earth's Future*, 8, e2020EF001543. <https://doi.org/10.1029/2020EF001543>

Haasnoot, M., Brown, S., Scussolini, P., Jiménez, J. A., Vafeidis, A. T., & Nicholls, R. J. (2019). Generic adaptation pathways for coastal archetypes under uncertain sea-level rise. *Environmental Research Communications*, 1, 071006. <https://www.doi.org/10.1088/2515-7620/ab1871>

Hoshino, S., Esteban, M., Mikami, T., Takagi, H., & Shibayama, T. (2016). Estimation of increase in storm surge damage due to climate change and sea level rise in the Greater Tokyo area. *Natural Hazards*, 80, 539-565. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1983-4>

IPCC, Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (1992). Cambio Climático: Las Evaluaciones del IPCC de 1990 y 1992. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: [www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc\\_90\\_92\\_assessments\\_far\\_full\\_report\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_full_report_sp.pdf). Fecha de consulta: 20 de julio de 2023.

IPCC, Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. [Archivo PDF]. [En línea]. Dispo-

nible en: [www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf). Fecha de consulta: 8 de noviembre de 2023.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2022). Summary for Policymakers. En H. O. Pörtner, D. C. Roberts, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, & A. Okem (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3-33). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: [www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](http://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf). Fecha de consulta: 17 de julio de 2023.

Izaguirre, C., Losada, I. J., Camus, P., Vigh, J. L., & Stenek, V. (2021). Climate change risk to global port operations. *Nature Climate Change*, 11, 14-20. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00937-z>

Jebbad, R., Sierra, J. P., Mösso, C., Mestres, M., & Sánchez-Arcilla, A. (2022). Assessment of harbour inoperability and adaptation cost due to sea level rise. Application to the port of Tangier-Med (Morocco). *Applied Geography*, 138, 102623. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102623>

Jevrejeva, S., Grinsted, A., & Moore, J. C. (2014). Upper limit for sea level projections by 2100. *Environmental Research Letters*, 9, 104008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104008>

Kirezci, E., Young, I. R., Ranasinghe, R., Muis, S., Nicholls, R. J., Lincke, D., & Hinkel, J. (2020). Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century. *Scientific Reports*, 10, 11629. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67736-6>

Kontogianni, A., Damigos, D., Kyrtzoglou, T., Tourkoulas, C., & Skourtos, M., (2018). Development of a composite climate change vulnerability index for small craft harbours. *Environmental Hazards*, 18, 173-190. <https://doi.org/10.1080/17477891.2018.1512469>

Krippendorff, K. (1990). Metodología de análisis de contenido. Teoría y práctica. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://www.media3turdera.com.ar/mediosyrealidad/Klaus-krippendorff.pdf>. Fecha de consulta: 20 de julio de 2023.

McEvoy, S., Haasnoot, M., & Biesbroek, R. (2021). How are European countries planning for sea level rise? *Ocean & Coastal Management*, 203, 105512. <https://www.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105512>

Messner, S., Moran, L., Reub, G., & Campbell, J. (2013). Climate change and sea level rise impacts at Ports and a consistent methodology to evaluate vulnerability and risk. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 169, 141-153. <https://doi.org/10.2495/CP130131>

Mudronja, G., Jugović, A., & Škalamera-Alilović, D. (2020). Seaports and Economic Growth: Panel Data Analysis of EU Port Regions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 1017. <https://doi.org/10.3390/jmse8121017>

Munim, Z. H. & Schramm, H. J. (2018). The impacts of port infrastructure and logistics performance on economic growth: the mediating role of maritime trade. *Journal of Shipping and Trade*, 3, 1-19. <https://doi.org/10.1186/s41072-018-0027-0>

Nazarnia, H., Nazarnia, M., Sarmasti, H., & Wills, W. O. (2020). A Systematic Review of Civil and Environmental Infrastructures for Coastal Adaptation to Sea Level Rise. *Civil Engineering Journal*, 6, 1375-1399. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091555>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... y Moher, D. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>

Portillo, J. N., Negro-Valdecantos, V., & del-Campo, J. M. (2022). Review of the Impacts of Climate Change on Ports and Harbours and Their Adaptation in Spain. *Sustainability*, 14, 7507. <https://doi.org/10.3390/su14127507>

PNUD-INECC, United Nations Development Programme-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). Impacto de la elevación del nivel del mar en la superficie y línea de costa de 35 islas pobladas y prioritarias de México. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: [https://datos.abiertos.inecc.gob.mx/Datos\\_abiertos\\_INECC/CGA](https://datos.abiertos.inecc.gob.mx/Datos_abiertos_INECC/CGA)

CC/DocumentosRIslasMarias/Eje3\_ImpactosDelCambioClimaticoEnTerritorioInsularMexicano/EstudiosAguirreEtAl/IslasMarLineaDeCosta.pdf. Fecha de consulta: 12 de julio de 2023.

Reyes-Bonilla, H., Diaz-Castro, S. C. y González-Baheza, A. (2020). El incremento del nivel del mar: afectación en costas mexicanas. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/2241/1/CapituloReyes-BonillaDiaz-CastroGonzalez-Baheza2020.pdf>. Fecha de consulta: 12 de julio de 2023.

Ribeiro, A. S., Lopes, C. L., Sousa, M. C., Gómez-Gesteira, M., Vaz, N., & Dias, J. M. (2023). Reporting Climate Change Impacts on Coastal Ports (NW Iberian Peninsula): A Review of Flooding Extent. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 477. <https://doi.org/10.3390/jmse11030477>

Saizar, A. (1997). Assessment of impacts of a potential sea-level rise on the coast of Montevideo, Uruguay. *Climate Research*, 9, 73-79. <https://doi.org/10.3354/cr009073>

Sierra, J. P. (2019). Economic Impact of Overtopping and Adaptation Measures in Catalan Ports Due to Sea Level Rise. *Water*, 11(7), 1440. <https://doi.org/10.3390/w11071440>

Sriver, R. L., Lempert, R. J., Wikman-Svahn, P., & Keller, K. (2018). Characterizing uncertain sea-level rise projections to support investment decisions. *PLoS ONE*, 13(2), 0190641. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190641>

Taherkhani, M., Vitousek, S., Barnard, P. L., Frazer, N., Anderson, T. R., & Fletcher, C. H. (2020). Sea-level rise exponentially increases coastal flood frequency. *Scientific Reports*, 10, 6466. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62188-4>

Tebaldi, C., Ranasinghe, R., Vousdoukas, M., Rasmussen, D. J., Vega-Westhoff, B., Kirezci, E., Kopp, R. E., Sriver, R., & Mentaschi, L. (2021). Extreme sea levels at different global warming levels". *Nature Climate Change*, 11, 746-751. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01127-1>

UNCTAD, Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (2022). Informe sobre el transporte marítimo. [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022overview\\_es.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022overview_es.pdf). Fecha de consulta: 27 de julio de 2023.

Verschuur, J., Koks, E. E., & Hall, J. W. (2022).

Ports' criticality in international trade and global supply-chain". *Nature Communications*, 13, 4351. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32070-0>

Verschuur, J., Koks, E. E., Li, S., & Hall, J. W. (2023). Multi-hazard risk to global port infrastructure and resulting trade and logistics losses. *Communications Earth & Environment*, 4, 5. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00656-7>

Winckler, P., Esparza, C., Mora, J., Melo, O., Bambach, N., Contreras-López, M., & Sactic, M. I. (2022). Impacts in ports on a tectonically active coast for climate-driven projections under the RCP 8.5 scenario: 7 Chilean ports under scrutiny. *Coastal Engineering Journal*, 64, 387-405. <https://doi.org/10.1080/21664250.2022.2088194>

Yang, Z., Ng, A. K. Y., Lee, P. T. W., Wang, T., Qu, Z., Sanchez-Rodrigues, V., Pettit, S., Harris, I., Zhang, D., & Lau, Y. Y. (2018). Risk and cost evaluation of port adaptation measures to climate change impacts. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 444-458. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.004>

Zviely, D., Bitan, M., & DiSegni, D. M. (2015). The effect of sea-level rise in the 21st century on marine structures along the Mediterranean coast of Israel: An evaluation of physical damage and adaptation cost. *Applied Geography*, 57, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.12.007>

"Microcápsulas del extracto etanólico de *Randia monantha*""Fruto de *Randia monantha*"

Imágenes de: Claudia Marcela Guillén Jiménez, Montserrat Calderón Santoyo, Katia Nayely González Gutiérrez

# Extracto de *Randia monantha* encapsulado con proteína de haba (*Vicia faba*): actividad antifúngica *in vitro* y caracterización fisicoquímica

## *Randia monantha* extract encapsulated with faba bean (*Vicia faba*) protein: *in vitro* antifungal activity and physicochemical characterization

Claudia Marcela Guillén-Jiménez, Montserrat Calderón-Santoyo, Katia Nayely González-Gutiérrez, Juan Arturo Ragazzo-Sánchez\*

### RESUMEN

Las proteínas vegetales han sido empleadas en diversos estudios como material de pared en la encapsulación de compuestos de alto valor biológico, debido a su buena accesibilidad y a la fácil liberación del principio activo. El haba (*Vicia faba*) es una legumbre con alto contenido de proteínas susceptible de ser utilizada como material encapsulante. *Randia monantha* contiene compuestos con actividad antifúngica, por lo que su extracción y encapsulación representa una alternativa para poder usarlos en el control post-cosecha de hongos fitopatógenos. El objetivo del presente trabajo fue encapsular por secado por aspersión un extracto etanólico de *R. monantha* utilizando como material de pared proteína de haba para el control de *Colletotrichum gloeosporioides*. El extracto se obtuvo mediante extracción etanólica asistida por ultrasonido y se encapsuló usando secado por aspersión con diferentes concentraciones de proteína de haba (15 %, 20 %, 25 % y 30 %). Posteriormente, se evaluó la actividad antifúngica del extracto encapsulado y se realizó la caracterización térmica y fisicoquímica de las cápsulas. El extracto encapsulado con proteína al 30 % presentó la mayor inhibición de la germinación de esporas (65.4 %) y del crecimiento micelial de *C. gloeosporioides* (55.23 %) y estabilidad a la temperatura y a la radiación UV. Las cápsulas registraron alta eficiencia de encapsulación y solubilidad, con baja actividad de agua e higroscopicidad, características deseables para un producto en polvo. La proteína de haba, como material encapsulante, mostró ser una alternativa prometedora para su uso en el control de *C. gloeosporioides*, ya que preservó la capacidad antifúngica del extracto de *R. monantha*, presentó propiedades fotoprotectoras y termoprotectoras y las cápsulas cumplieron con los parámetros fisicoquímicos de un producto en polvo.

**PALABRAS CLAVE:** proteína vegetal, secado por aspersión, encapsulación, capacidad inhibitoria.

### ABSTRACT

Vegetable proteins have been used in various studies as wall material in the encapsulation of high biological value compounds, due to their good accessibility and the easy release of the active substance. Faba (*Vicia faba*) is a legume with a high protein content that can be used as an encapsulating material. *Randia monantha* contains compounds with antifungal activity, therefore their extraction and encapsulation represent an alternative for use in the postharvest control of phytopathogenic fungi. The objective of the present work was to encapsulate by spray drying an ethanolic extract of *R. monantha* using faba bean protein as a wall material for the control of *Colletotrichum gloeosporioides*. The extract was obtained through ultrasound-assisted ethanolic extraction and was encapsulated by spray drying with different concentrations of faba bean protein (15 %, 20 %, 25 %, and 30 %). Subsequently, the antifungal activity of the encapsulated extract was evaluated, and the thermal and physicochemical characterization of the capsules was performed. The 30 % protein-encapsulated extract showed the highest inhibition of spore germination (65.4 %) and mycelial growth of *C. gloeosporioides* (55.23 %) and stability to temperature and UV radiation. The capsules registered high encapsulation efficiency and solubility, with low water activity and hygroscopicity, desirable characteristics for a powder product. Faba bean protein, as an encapsulating material, proved to be a promising alternative for use in the control of *C. gloeosporioides* since it preserved the antifungal capacity of the *R. monantha* extract, presented photoprotective and thermoprotective properties and the capsules achieved the physicochemical parameters of a powder product.

**KEYWORDS:** vegetable protein, spray drying, encapsulation, inhibitory capacity.

\*Correspondencia: jragazzo@tecip.tecnm.mx/ Fecha de recepción: 20 de septiembre de 2024/ Fecha de aceptación: 24 de enero de 2025/ Fecha de publicación: 31 de enero de 2025.

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tepic, Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, Av. Tecnológico núm. 2595, Lagos del Country, Tepic, Nayarit, México, C. P. 63175.

## INTRODUCCIÓN

La accesibilidad de las proteínas derivadas de los productos vegetales las ha hecho cada vez más populares para su aprovechamiento. Entre sus aplicaciones se encuentra la sustitución de la proteína animal, en la elaboración de piensos (alimento para ganado) y como materiales de pared para la encapsulación de compuestos de alto valor biológico (CAVB), aunado a que se consideran biodegradables y con propiedades foto y termo protectoras (Ismail y col., 2020; Kumar y col. 2022).

Las proteínas como material de pared crean una coraza que actúa como agente estabilizante en la encapsulación y ayuda a proteger el núcleo. Entre las ventajas de utilizar proteínas vegetales destaca que son consideradas GRAS (por sus siglas en inglés: generally recognized as safe), de fácil accesibilidad, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Dissanayake y Bandara, 2024). Entre las proteínas que se han utilizado como material de pared para encapsular CAVB, están las de lenteja (Wang y col., 2022), maíz (zeína), quinoa y el aislado de soya (Mahdi-Jafari y col., 2017). Sin embargo, existen proteínas que aún no han sido investigadas, tal es el caso de la proteína de haba (*Vicia faba*).

El haba es una de las legumbres más producidas a nivel mundial, ocupa una cuota anual de mercado de aproximadamente 4.84 millones de T de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés: Food and Agriculture Organization of the United Nations) (FAO, 2021). Las habas se caracterizan por su composición de minerales, carbohidratos, fibra, lípidos, pero sobre todo destaca por su alta composición de proteínas (Rodiño y col., 2005; Karkanis y col., 2018). Existen diversos reportes del contenido de proteína de haba. Schumacher y col. (2011) indicaron un rango de 18 % a 29 % y Hacisalihoglu y col. (2020) documentaron dicho contenido en un rango de 12.6 % a 33.1 %. Su fracción proteica mayoritaria la representan las globulinas (42 % aproximadamente), constituidas por las fracciones

legúmina, vicilina y convicilina (Duodu y Apea-Bah, 2017), mismas que se consideran proteínas de reserva y se encuentran en los cuerpos proteicos. Otras proteínas de reserva presentes son las albúminas (20 %), caracterizadas por tener un elevado número de aminoácidos azufrados. Las glutelinas constituyen el 15 % y en menor proporción se encuentran las prolaminas con un 5 % (Duodu y Apea-Bah, 2017). Este alto contenido de proteínas la hace apta para la encapsulación, debido a que le confiere capacidad de formar una estructura tridimensional, con adecuada estabilidad, tamaño y forma (Warsame y col., 2020; Żmudziński y col., 2021).

Existen diversas tecnologías para la encapsulación, como los procesos *electrohidrodinámicos electrospraying* (electropulverización) y *electrospinning* (electrohilado) (Alehosseini y col., 2018), la coacervación, extrusión, emulsificación y secado por aspersion (Yan y col., 2022). Esta última se considera una de las más usadas a nivel industrial y destaca por su factibilidad, capacidad para obtener mayor rendimiento en tiempos más cortos de proceso, producción de partículas uniformes, mejorar la conservación del producto al evitar la descomposición de componentes sensibles al calor y posibilidad de ser escalada y operada como un proceso continuo y cerrado (Chamudeshwari y col., 2024).

El secado por aspersion transforma una solución polimérica en polvo mediante una corriente de aire caliente. Durante este proceso, el equipo, a través del uso de un atomizador, dispersa la solución en microgotas que se ponen en contacto con el aire caliente en la cámara de secado, deshidratándolo. Posteriormente, el producto seco se recolecta en el ciclón. Las cápsulas obtenidas pueden tener diversos usos, ya sea para aplicación en el área de la industria de los alimentos o en usos nutraceuticos (Fatnassi y col., 2013).

Actualmente, las prácticas agrícolas para el control de hongos en las frutas utilizan, por lo general, fungicidas sintéticos elaborados a ba-

se de sustancias químicas (Mariscal-Amaro y col., 2020), que causan problemas de toxicidad tanto en los seres humanos como en el medio ambiente. Debido a esto, se han desarrollado estrategias alternativas conocidas como biofungicidas o agentes naturales con actividad antifúngica, los cuales están elaborados a partir de productos o subproductos naturales. Existen productos vegetales subutilizados, que son una fuente importante de CAVB, tales como flavonoides, saponinas y fenoles, entre otros, que presentan actividad antifúngica (Gatto y col., 2011; Ojeda-Ayala y col., 2022). Estos compuestos bioactivos podrían ser encapsulados mediante secado por aspersion y las cápsulas podrían ser utilizadas para el control de las enfermedades fúngicas que presentan los frutos.

Estudios recientes han demostrado que los CAVB identificados en el extracto etanólico de *R. monantha* inhiben hongos fitopatógenos, tales como *Collectotrichum gloeosporioides* y *Penicillium digitatum*, agentes causales de la antracnosis y moho verde, respectivamente (Vilchis-Gómez y col., 2024). *R. monantha* es conocida comúnmente como “crucecillo” en localidades que van desde el sur de México hasta Panamá. Su fruto contiene una pulpa oscura, con presencia de compuestos fenólicos con actividad antioxidante, que incluyen el ácido clorogénico (81.11 µg/g de extracto), quercetina (1.61 µg/g de extracto), rutina (51.61 µg/g de extracto), ácido 4-cumárico (30.29 µg/g de extracto) y ácido cafeico (21.95 µg/g de extracto) (Méndez-Ventura y Hernández-Medel, 2009; Juárez-Trujillo y col., 2018). Se ha reportado que, de forma individual, estos compuestos presentan actividad antifúngica sobre las membranas celulares de los hongos, debido a su capacidad para interactuar con los lípidos y proteínas de la membrana, así como para reducir el pH extracelular e inhibir a la 1.6-β- y 1.3-β-glucano sintetasa (Simonetti y col., 2020; Oulahal y Degraeve, 2022).

La escasa información sobre la posible aplicación de la proteína de haba como material encapsulante abre una oportunidad y perspec-

tiva novedosa para explorar su potencial en la encapsulación de extractos vegetales como *R. monantha* para ser destinado al control de hongos fitopatógenos. Además, la utilización de la proteína de haba como material encapsulante podría ofrecer una alternativa más sostenible y económica en comparación con otros materiales de encapsulación sintéticos. Este enfoque también contribuye a la búsqueda de soluciones innovadoras para el control biológico de enfermedades fúngicas, alineándose con las tendencias actuales de utilizar recursos naturales y sostenibles en la agricultura (Pandit y col., 2022).

El objetivo del presente trabajo fue encapsular mediante secado por aspersion un extracto etanólico de *R. monantha*, empleando como material de pared las proteínas de haba, así como caracterizar las propiedades fisicoquímicas y térmicas de las cápsulas y determinar el efecto inhibitorio del extracto encapsulado sobre el hongo *C. gloeosporioides*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material vegetal

El fruto de *R. monantha* fue obtenido de un huerto en La Vigueta, Tecolutla, Veracruz, México (20°20'11" N y 96°52'50" W). Los frutos fueron lavados con agua corriente y secados a 50 °C en un horno de convección (Novatech, HS60-AID, Jalisco, México) durante 25 h. La proteína de haba fue obtenida de Quebec, Canadá, de la empresa AGT Food and Ingredients.

### Obtención del extracto de *R. monantha*

Para obtener el extracto, se empleó la metodología propuesta por Vilchis-Gómez y col. (2024). Los frutos, previamente deshidratados, se pulverizaron en un molino eléctrico (Gustark, 2000 G, Ciudad de México, México) y el polvo obtenido se tamizó con una malla No. 100 (ASTM: 100; 150 µm. Posteriormente, para extraer los CAVB se mezcló el polvo del fruto con disolvente etanólico al 80 % en una proporción 1:30 (p/v). Después, para mejorar la extracción, se empleó ultrasonido (Branson Ultrasonics Corporation, 150D, Connecticut, EE. UU.)

con una amplitud del 60 % durante 7.5 min. Finalmente, se filtró con un papel filtro Whatman No. 1 (diámetro 150 mm) (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU) y el extracto se concentró en un rotavapor (IKA, RV10, Flawil, Suiza) a 50 °C con una presión de vacío de 90 kPa.

### Encapsulación del extracto de *R. monantha* mediante secado por aspersión

#### Determinación de la temperatura de entrada al secador

Para determinar la temperatura de secado se empleó la calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés: Differential Scanning Calorimetry) (TA-Instruments, DSC 250, New Castle, EE. UU). Se colocaron 4 mg de proteína de haba en una charola de aluminio hermética. Se utilizó una charola de aluminio vacía como referencia. Se programó una rampa de calentamiento de 10 °C/min y el análisis se llevó a cabo de 25 °C hasta 400 °C/min, bajo atmósfera de nitrógeno y un caudal de 40 mL/min. La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) se determinó calculando el punto medio de la región de transición en la señal del flujo de calor. Los datos obtenidos se analizaron mediante el software TRIOS, 5.0.0.44616 (Ramos-Hernández y col., 2023).

#### Preparación de la solución polimérica

La proteína de haba se disolvió en agua destilada estéril, en un frasco ámbar, por 30 min a 22 °C a diferentes concentraciones (15 %, 20 %, 25 % y 30 %, p/p). Después, se le añadió el extracto de *R. monantha* al 3 % p/p y se homogeneizó en un agitador magnético (Pren-do, PCA-1500, Puebla, México) por 4 h a 22 °C. La solución se sometió al proceso de secado por aspersión.

#### Proceso de secado por aspersión

La solución polimérica, previamente preparada, se usó para alimentar un secador por aspersión Mini Spray Dreyer (Labortechnik, Büchi B-290, Flawil, Suiza). La solución se atomizó mediante una boquilla (Labortechnik, Büchi B-290-0.7mm, Flawil, Suiza) bajo las siguientes condiciones: temperatura del aire de

entrada al secador de 115 °C, flujo de alimentación de la muestra 3 mL/min, caudal de aire 35 m<sup>3</sup>/h y presión de aire de 0.5 MPa. La solución polimérica se mantuvo en agitación constante a 120 rpm y 22 ± 1 °C. Una vez terminado el proceso, las cápsulas se recolectaron del vaso colector del equipo y se conservaron en tubos falcón estériles dentro de un desecador para sus posteriores análisis.

#### Estudio de fotoprotección de las cápsulas

Se utilizó una lámpara de 300 W (Osram, Ultra Vitalux, Munich, Alemania) para simular la radiación de la luz solar. El procedimiento se realizó en una cámara oscura; la distancia entre la lámpara y la muestra fue de 40 cm. Se expusieron a la luz UV, 2.5 g de extracto crudo y extracto encapsulado (a las 4 concentraciones de proteína de haba). Se determinó, en cada muestra, la capacidad de oxidación relativa del radical de ABTS<sup>+</sup>, al finalizar cada tiempo de exposición UV (0 h, 6 h, 12 h, 24 h y 48 h), mediante lectura a 734 nm en un espectrofotómetro (Varian, Cary 50 Bio UV-Visible, Mulgrave, Australia), utilizando ABTS<sup>+</sup> previamente preparado y ajustado a un radical de 0.70 con agua destilada. Para cada tiempo de exposición a radiación UV se aplicó un diseño estadístico unifactorial y la variable de respuesta evaluada fue la oxidación relativa. El análisis se realizó por triplicado y los resultados se representaron en una gráfica, de acuerdo con el porcentaje de oxidación de ABTS<sup>+</sup> respecto al tiempo transcurrido (Calderón-Santoyo y col., 2022).

#### Análisis termogravimétrico (TGA) de las cápsulas

Las variaciones de masa y las temperaturas de descomposición de la proteína de haba, extracto y extracto encapsulado se determinaron mediante un análisis termogravimétrico en un equipo TGA (TA Instruments, TGA 550, New Castle, EE.UU.). Se colocaron 5 mg de muestra en una charola de platino de alta temperatura. La velocidad de calentamiento fue de 10 °C/min, en un rango de 25 °C a 800 °C bajo una atmósfera de nitrógeno. La pérdida de peso y la temperatura de descomposi-

ción (Td) se analizaron con el software TRIOS, 5.0.0.44616 (TA Instruments Universal Analysis, New Castle, EE. UU.) (Iñiguez-Moreno y col., 2022).

#### Eficiencia de carga

La eficiencia de carga (EC) se determinó según los datos obtenidos en el TGA con el software TRIOS 5.0.0.44616, utilizando la ecuación 1.

$$\% EC = \left(1 - \left(\frac{\text{Fracción total} - \text{Fracción final}}{\text{Fracción total}}\right)\right) * 100 \quad (1)$$

#### Eficiencia de encapsulación

Se homogeneizaron 5 mg de cápsulas con 1 mL de agua y se agitaron en vortex por 1 min a temperatura ambiente. Posteriormente, la mezcla se centrifugó (Hermle, Z326K, Wehingen, Alemania) a 10 000 rpm durante 1 min. Después, se separó la fracción soluble (sobrenadante) y se le determinó la absorbancia a 210 nm utilizando un espectrofotómetro (Varian, Cary 50 Bio UV-Visible, Mulgrave, Australia). Se consideró el % EC para calcular la cantidad de fracción cargada (ecuación 2). Una vez obtenidos los valores, se calculó el % de eficiencia de encapsulación (EE) según la ecuación 3. Se aplicó un diseño estadístico unifactorial, se consideró como variable independiente la concentración de proteína de haba y como variable dependiente la EC y EE.

$$\text{Fracción cargada} = \left(\frac{\% EC * \text{Fracción total}}{100}\right) \quad (2)$$

$$\% EE = \left(\frac{\text{Fracción cargada} - \text{Fracción en la superficie}}{\text{Fracción cargada}}\right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

Fracción en la superficie = cantidad de extracto en la superficie de las cápsulas.

Fracción cargada = cantidad total de extracto en las cápsulas.

#### Caracterización fisicoquímica de las cápsulas

##### Actividad de agua

Se utilizó un equipo Aqualab 4TEV (Decagon

Devices Inc., WA, EE.UU.). Se colocaron 5 g de muestra dentro de la cámara y la lectura se realizó a 25 °C. La actividad de agua (Aw) se determinó mediante el principio del punto de rocío.

##### Humedad

Se determinó por el método de TGA. Se colocaron 5 mg del polvo en una charola de platino de alta temperatura. La velocidad de calentamiento fue de 10 °C/min en un rango de 25 °C a 800 °C bajo una atmósfera de nitrógeno. Los datos obtenidos se analizaron con el software TRIOS 5.0.0.44616.

##### Solubilidad

Se determinó siguiendo la metodología de Jiménez-Sánchez y col. (2018). Se diluyó un gramo de polvo en 100 mL de agua destilada, se agitó manualmente hasta solubilizar toda la muestra y se centrifugó durante 5 min. Se tomó una alícuota de 25 mL del sobrenadante y se colocó en cajas Petri. Finalmente, se secó en estufa (Novatech, HS60-AID, Jalisco, México) a 100 °C durante 5 h. La solubilidad (%) se calculó por diferencia de peso.

##### Densidad aparente

Se colocó 1 g de cápsulas en una probeta graduada de 10 mL. La probeta se movió hacia arriba y hacia abajo durante 1 min hasta que se obtuvo una lectura constante del volumen de polvo. La densidad se calculó con la ecuación 4 y se expresó en g/mL.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa de la muestra (g)}}{\text{Volumen ocupado en la probeta}} * 100 \quad (4)$$

##### Higroscopicidad

Se colocó 1 g de cápsulas en cajas Petri a peso constante y se almacenaron en un desecador de vidrio a una temperatura ambiente de 24 °C y 75 % de humedad relativa (36 g NaCl en 100 mL de agua). El peso del polvo se registró una vez al día durante 5 d. La higroscopicidad se determinó con la ecuación 5 y se expresó en gramos de agua absorbida por 100 g de muestra seca.

$$\text{Higroscopicidad} \left( \frac{g H_2O}{100g \text{ muestra}} \right) = \frac{mf-mi}{mi} * 100 \quad (5)$$

Donde

mf = Peso en gramos del polvo al final del proceso

mi = Peso inicial del polvo (g)

### Evaluación antifúngica *in vitro* del extracto encapsulado

#### Preparación del hongo fitopatógeno

*C. gloeosporioides* LMA-Mi01 (Número de acceso: MZ254665) fue aislado del epicarpio del fruto de mango y caracterizado filogenética y morfológicamente por López-Cruz y col. (2020). El hongo fue crioconservado en glicerol al 80 % (v/v) a - 80 °C hasta su uso. *C. gloeosporioides* se cultivó en cajas de Petri con Agar Papa Dextrosa (APD) (BD Bioxon, Estado de México, México) y se incubó durante 8 d a 28 °C. La suspensión de esporas se preparó a partir de un cultivo de 15 d de antigüedad, al cual se le añadieron 10 mL de solución NaCl 0.85 % estéril y se raspó con un asa estéril. El líquido se filtró con una gasa estéril y se recuperó en un tubo cónico. La concentración de esporas se ajustó a  $1 \times 10^5$  esporas/mL con un hemocitómetro (LO-Laboroptik Ltd, Lancing, Reino Unido) (González-Gutiérrez y col., 2023).

#### Evaluación antifúngica *in vitro*

Se realizó de acuerdo a la metodología propuesta por González-Gutiérrez y col. (2024). Se disolvieron cápsulas en 10 mL de agua estéril; la cantidad de cápsulas en cada tratamiento se calculó para obtener la concentración mínima inhibitoria del extracto (17.65 mg/mL), previamente reportada por Vilchis-Gómez y col. (2024) para la inhibición de *C. gloeosporioides*. Posteriormente, se añadieron 500  $\mu$ L sobre cajas de Petri con APD previamente solidificado. La solución se esparció con ayuda de una varilla estéril y las cajas se dejaron secar por 1 h. Posteriormente, se perforó el centro de cada una de las cajas (7 mm) y se colocaron 20  $\mu$ L de suspensión de esporas ( $1 \times 10^5$  esporas/mL) o un tapón de micelio de *C. gloeos-*

*porioides*. Después, las cajas Petri se sellaron con parafilm y se incubaron durante 8 d a 28 °C. Para el tratamiento control, solo se inoculó el patógeno. Se aplicó un diseño estadístico unifactorial para la prueba con esporas y micelio, en ambos casos. La variable de respuesta evaluada fue el porcentaje de inhibición *in vitro*. El experimento se repitió 3 veces con 5 réplicas por tratamiento. La inhibición del crecimiento se calculó con la ecuación 6.

$$\text{Inhibición (\%)} = \frac{dc-dt}{dc} * 100 \quad (6)$$

Donde:

dc = diámetro en centímetros de la colonia fúngica en el control.

dt = diámetro en centímetros de la colonia fúngica en el tratamiento.

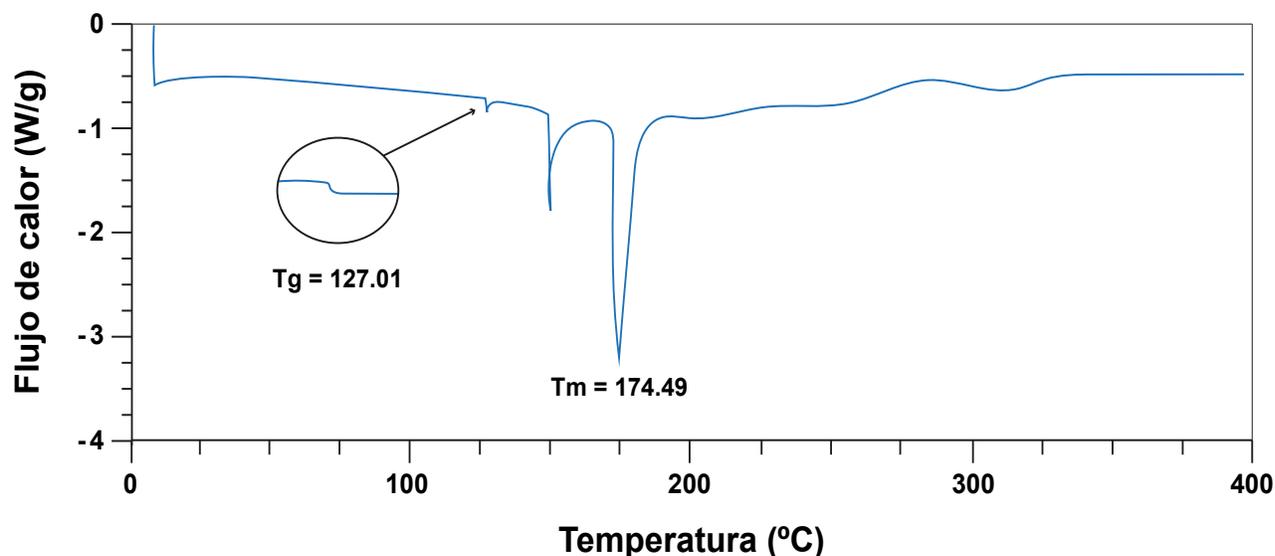
#### Análisis estadístico

Los parámetros fisicoquímicos se analizaron mediante una prueba t para poblaciones independientes. El resto de los experimentos se llevaron a cabo mediante análisis de varianza de una vía (ANOVA, por sus siglas en inglés: Analysis of Variance). Para la comparación de medias ( $\pm$  desviación estándar) se utilizó la prueba *Post-hoc* de diferencia mínima significativa (LSD, por sus siglas en inglés: least significance difference) de Fisher ( $P < 0.05$ ). El análisis estadístico de los datos se realizó con el software STATISTICA v.12, StatSoft, Inc.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Calorimetría diferencial de barrido

En el termograma DSC de la proteína de haba (Figura 1) se puede observar que, la primera disrupción de la línea base se debió a la temperatura de transición vítrea (Tg) a 127.01 °C, que indica el cambio del polímero de un estado duro o vítreo a un estado blando o gomoso (Meng y Zhang, 2014). Posteriormente, se observaron dos picos endotérmicos, el primero a 149.57 °C, asociado con la evaporación del agua libre y ligada (Calderón-Santoyo y col., 2022) y el segundo a 174.49 °C, que se atribuye a la temperatura de fusión (Tm) (Alpizar-Reyes y col., 2018) del material polimérico. Se ha reportado como 130 °C el valor de Tg para la proteí-



■ Figura 1. Termograma (DSC) de la proteína de haba.

Figure 1. Thermogram (DSC) of faba bean protein.

na de haba (Saldanha-do-Carmo y col., 2021). Las diferencias respecto a este estudio pueden estar asociadas con la procedencia, la composición de las muestras y/o el procesamiento al cual ha sido sometida la proteína de haba.

El valor obtenido de la Tg permitió establecer en 115 °C la temperatura de entrada del aire al secador, para pulverizar la solución polimérica sin que pasara de su estado vítreo a uno gomoso, lo cual sucedería a los 127.01 °C, y provocaría que la proteína se aglomerase en la cámara de secado. Esto ocasiona que mejore su función como material de pared en las cápsulas, para el extracto.

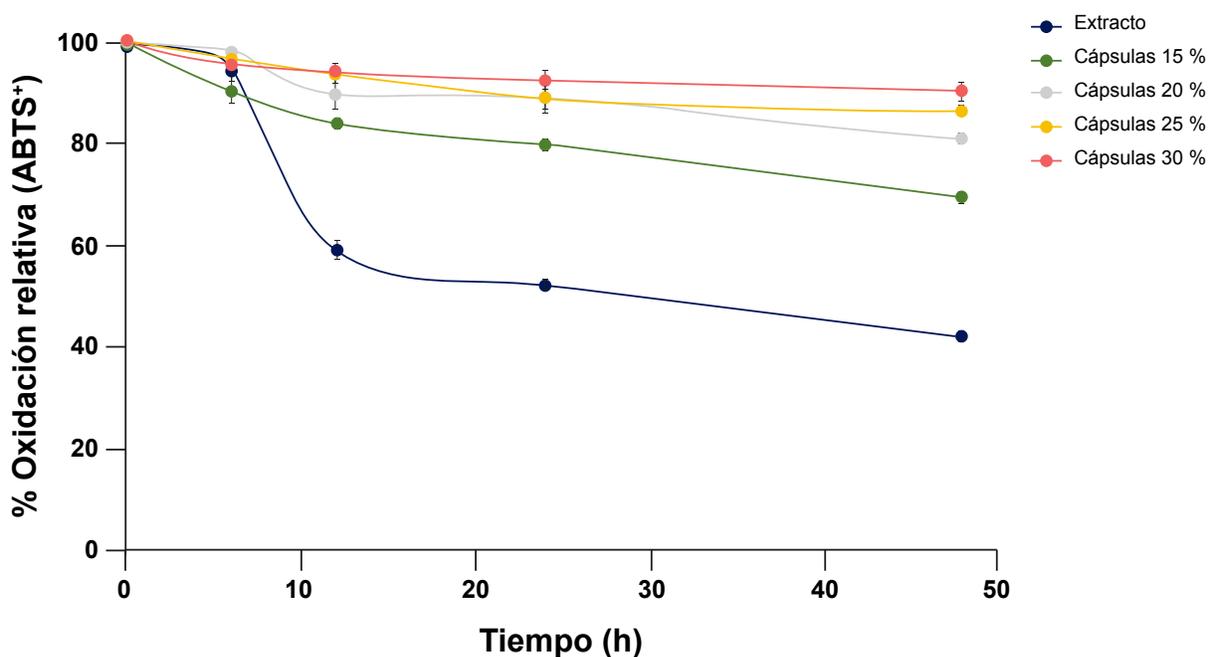
#### Evaluación de la fotoprotección de las cápsulas con extracto de *R. monantha*

En el análisis del efecto de la UV en el extracto crudo, se observó una pérdida del 58 % de su capacidad antioxidante inicial (ABTS<sup>+</sup>), después de 48 h de exposición a la luz UV (Figura 2). Las cápsulas mostraron capacidad fotoprotectora, que aumentó con la concentración proteica, pasando de conservar el 69 % de su capacidad antioxidante en la muestra con la menor concentración de proteína (15 %), a un 90 % ( $P < 0.05$ ), en las cápsulas con 30 %

de proteína, es decir, una oxidación relativa del 10 %.

El efecto fotoprotector del material encapsulante, sobre los CAVB contenidos en el extracto de *R. monantha*, proporcional a la concentración proteica, podría deberse a que algunas estructuras moleculares de las proteínas vegetales pueden absorber la luz UV. Específicamente, la proteína de haba se caracteriza por contener aminoácidos azufrados, que son aminoácidos con cadenas laterales que contienen azufre. Cuando estos aminoácidos se exponen a la luz UV pueden provocar reacciones fotoquímicas. Estas reacciones implican la absorción de fotones UV por el átomo de azufre (Stampfli y Seebeck, 2020), lo que le confiere a la leguminosa esta capacidad fotoprotectora.

Estudios previos han reportado proteínas vegetales con efectos positivos sobre fotoprotección a compuestos, tal es el caso de González-Cruz y col. (2022), quienes documentaron que, la zeína utilizada como material encapsulante brindó una buena protección de hasta el 86 % ante la radiación UV. Así mismo, Vilchis-Gómez y col. (2024), documentaron la



■ Figura 2. Oxidación relativa del extracto sin encapsular y encapsulado con proteína de haba al 15 %, 20 %, 25 % y 30 %. Los puntos representan la media y las líneas verticales la desviación estándar. Figure 2. Relative oxidation of the non-encapsulated extract and encapsulated with 15 %, 20 %, 25 %, and 30 % of faba bean protein. The dots represent the mean and the vertical lines the standard deviation.

aplicación de la proteína de hoja de jaca como material emulsionante para el extracto de *R. monantha*, la cual brindó una protección de hasta el 90 % ante la radiación UV.

#### Análisis termogravimétrico (TGA) de las cápsulas

Se obtuvieron las temperaturas de descomposición y las variaciones de masa de las cápsulas y del extracto (Tabla 1). La primera disminución de peso del extracto (1.11 %) se atribuyó a la pérdida de humedad; y la segunda disminución (57.18 %) se atribuyó a la descomposición de la materia del extracto ( $T_d = 211.85\text{ }^\circ\text{C}$ ). En el caso de las cápsulas con y sin extracto, la primera reducción de peso se debió a la pérdida de humedad con 4.97 % y 5.93 %, respectivamente. Para las cápsulas vacías, la segunda pérdida de peso (54.55 %) se atribuyó a la descomposición de las globulinas, albúminas y glutelinas ( $T_d = 274.16\text{ }^\circ\text{C}$ ), mientras que para las cápsulas con extracto, la segunda pérdida de peso (54.49 %) se debió

a la descomposición del extracto y de la proteína ( $T_d = 290.09\text{ }^\circ\text{C}$ ). La  $T_d$  del extracto encapsulado ( $290.09\text{ }^\circ\text{C}$ ) fue superior a la  $T_d$  del extracto crudo ( $211.85\text{ }^\circ\text{C}$ ). No se observó un evento simultáneo de descomposición (TGA) y fusión (DSC). Este comportamiento evidencia una mayor estabilidad de las cápsulas vacías y con extracto a temperaturas de  $230.71\text{ }^\circ\text{C}$  y  $260.67\text{ }^\circ\text{C}$  (inicio de la descomposición por TGA), las cuales son superiores a la  $T_m$  registrada en el DSC ( $174.49\text{ }^\circ\text{C}$ ) para la proteína de haba (Figura 1).

Los hallazgos muestran que la proteína de haba ejerce un efecto termoprotector sobre el extracto de *R. monantha*, con un incremento de  $T_d = 78.24\text{ }^\circ\text{C}$ . Por otra parte, la  $T_d$  de las cápsulas vacías fue menor que la de las cápsulas con extracto, el incremento de  $15.93\text{ }^\circ\text{C}$  muestra que el extracto encapsulado es más estable térmicamente que las cápsulas vacías. Por lo tanto, una vez que las cápsulas sean aplicadas en el epicarpio de los frutos, la pro-

■ **Tabla 1. Análisis termogravimétrico (TGA) de las cápsulas de proteína de haba con y sin extracto.**  
 Table 1. Thermogravimetric analysis (TGA) of faba bean protein capsules with and without extract.

Compuesto/ cápsula	Eventos térmicos por TGA					
	Temperatura de descomposición					Cambios observados
	Rango (°C)	Inicio (°C)	Punto medio (°C)	Final (°C)	Pérdida de peso (%)	Atribución de pérdida de peso
Extracto	24.87 a 100	83.63	89.86	98.77	1.118	Agua libre y ligada
	150 a 380	175.19	211.85	237.67	57.18	Descomposición de la materia del extracto
	500 a 793.03	642.68	689.06	784.77	19.605	Minerales
Cápsulas vacías	25 a 110	35.94	52.31	68.72	5.93	Agua libre y ligada
	149 a 372	230.71	274.16	317.55	54.55	Descomposición de las globulinas, albuminas y glutelinas
	500 a 792	561.84	590.61	619.34	16.91	Minerales
Cápsulas + extracto	25 a 100	31.64	47.02	60.69	4.97	Agua libre y ligada
	205 a 380	260.67	290.09	319.58	54.49	Descomposición del extracto y de la proteína
	486 a 800	753.53	774.42	762.84	8.96	Minerales

teína de haba podrá favorecer la conservación del extracto, brindando termoestabilidad a los compuestos fenólicos para ejercer su acción contra *C. gloeosporioides*.

#### Eficiencia de encapsulación y eficiencia de carga

Los datos obtenidos indican que a medida que aumentó el porcentaje de proteína, tanto la EE, como la de carga incrementaron (Tabla 2). Las cápsulas con el porcentaje más alto de proteína alcanzaron hasta un 70.15 % de EE, mien-

tras que el mayor valor de EC alcanzó hasta un 36.03 %. Dicho comportamiento es debido a las interacciones mejoradas entre la proteína de haba y el extracto, ya que, al momento de aplicar mayor porcentaje de polímero, este crea enlaces intermoleculares que forman una coraza más gruesa, que induce una encapsulación más eficiente (Selim y col., 2021). Los presentes hallazgos evidencian que el cambio de los porcentajes utilizados de la composición del material de la pared es una estrategia eficaz para mejorar la EE de las cápsulas a base

■ **Tabla 2. Eficiencia de encapsulación (EE %) y eficiencia de carga (EC %) de las cápsulas con extracto.**  
 Table 2. Encapsulation efficiency (EE %) and loading efficiency (LE %) of capsules with extract.

Tratamiento/Cápsula	EE (%)	EC (%)
Proteína de haba 15 %	49.83 ± 0.02 <sup>a</sup>	25.73 ± 0.32 <sup>a</sup>
Proteína de haba 20 %	57.22 ± 1.23 <sup>b</sup>	31.20 ± 1.43 <sup>b</sup>
Proteína de haba 25 %	63.78 ± 0.55 <sup>c</sup>	32.68 ± 0.63 <sup>c</sup>
Proteína de haba 30 %	70.15 ± 1.09 <sup>d</sup>	36.03 ± 0.89 <sup>d</sup>

Los valores representan la media ± desviación estándar. Para cada parámetro, los valores medios con la misma letra indican que no existe diferencia significativa entre los tratamientos según la prueba LSD de Fisher (P < 0.05).

de proteínas. Los resultados fueron mejores a los reportados por Suárez y Brito (2020), quienes obtuvieron una EE de 32.83 %, al utilizar proteína de zeína para encapsular antocianinas.

### Caracterización fisicoquímica de las cápsulas

Se realizó la caracterización de las cápsulas al 30 % de proteína, ya que estas fueron las que obtuvieron mejores resultados en cuanto a la EE, EC, fotoprotección y consecuentemente, fueron las que presentaron mayor potencial de inhibición fúngica.

### Actividad de agua

Todas las muestras presentaron una baja actividad de agua ( $A_w$ ) (Tabla 3) indicando que eran estables, con reducida susceptibilidad a presentar desarrollo microbiano, o reacciones bioquímicas que deteriorasen el producto en polvo (Gabas y col., 2009), resultados esperados en la encapsulación mediante secado por aspersión, proceso que permite la estabilidad del extracto. Las cápsulas vacías presentaron mayor valor ( $P < 0.05$ ) de  $A_w$  (0.32) y contenido de humedad (5.95 %) que las cápsulas con extracto ( $A_w = 0.26$ ; 4.97 %) (Tabla 3). Esto indica que, la incorporación del extracto provocó un aumento en el contenido de sólidos, e indujo interacciones soluto-líquido, entre el extracto y los componentes de la cápsula (Gharsallaoui y col., 2012) que modificaron la cantidad de agua libre. En otros estudios, se han reportado valores de  $A_w$  menores de 0.70 en proteínas aplicadas como material de pared, lo

cual favorecen su conservación y evita el crecimiento de microorganismos (Dumitrașcu y col., 2021).

### Determinación de humedad

El porcentaje de humedad de las cápsulas con extracto fue menor ( $P < 0.05$ ) respecto a las cápsulas vacías (Tabla 3), ya que el extracto tenía una humedad inicial baja (1.11 %), por lo que no provocó un incremento en el contenido de humedad (Ulfa y col., 2023). Además, la adición de extracto aumentó el contenido de sólidos, lo que llevó a una disminución en el contenido de humedad de las cápsulas. Por otro lado, se ha reportado que los compuestos fenólicos tienen la capacidad de retener agua estructural mediante enlaces de hidrógeno fuertes (OH-O) y débiles (CH-O), así como favorecer la deshidratación durante el proceso de encapsulación (Malloum y Conradie, 2023).

### Solubilidad de las cápsulas

Las cápsulas con extracto, así como las cápsulas vacías mostraron una solubilidad del 100 % (datos no mostrados en Tablas), lo que permite determinar qué se obtendrá una eficaz liberación del encapsulado. Esta alta solubilidad en agua de las cápsulas se atribuye al material encapsulante, ya que, como se ha reportado, la proteína de haba es totalmente soluble en agua, debido a su composición de aminoácidos, el tipo de enlaces intermoleculares (hidrofilicos) y la conformación estructural (Zhu y Huang, 2019).

■ **Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos de las cápsulas.**

Table 3. Physicochemical parameters of the capsules.

Tratamiento	$A_w$	Humedad (%)	Higroscopicidad ( $\text{g H}_2\text{O} / 100 \text{ g muestra}$ )	Densidad aparente ( $\text{g/mL}$ )
Cápsulas vacías	$0.3275 \pm 0.01^a$	$5.95 \pm 0.3^a$	$13.51 \pm 0.1^a$	$0.33 \pm 0.14^a$
Cápsulas 30 % de proteína + extracto	$0.2652 \pm 0.02^b$	$4.97 \pm 0.1^b$	$12.59 \pm 0.2^b$	$0.28 \pm 0.02^b$

Los valores representan la media  $\pm$  desviación estándar. Para cada parámetro las letras diferentes significan diferencia significativa entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ).

### Higroscopicidad de las cápsulas

Las cápsulas sin extracto presentaron mayor higroscopicidad (13.51 %), en comparación con las cápsulas que contenían el extracto (12.59 %) ( $P < 0.05$ ) (Tabla 3). Una posible explicación es que el extracto podría haber actuado como una barrera contra la humedad, reduciendo la capacidad de la cápsula para absorber agua del entorno circundante (Sarabandi y col., 2018). Además, cuando se aplica el extracto, este puede formar enlaces intermoleculares que pueden evitar la interacción de los grupos OH de la proteína de haba con el agua del ambiente, afectando su capacidad de absorción de agua (Ramos-Hernández y col., 2021).

### Densidad aparente

Las cápsulas con extracto presentaron densidad aparente de 0.28 g/mL, mientras que en las cápsulas vacías fue de 0.33 g/mL (Tabla 3). La diferencia pudo ser causada por distintos factores, como la presencia del extracto, contenido de humedad y la viscosidad de la solución polimérica. En estudios previos Wu y col. (2022) reportaron que la higroscopicidad puede afectar significativamente la densidad aparente del polvo, ya que la tendencia de un material a absorber humedad del entorno circundante puede impactar en su densidad aparente. A medida que aumenta la naturaleza higroscópica de un polvo puede conducir a la formación de una fina película de agua adsorbida en la superficie de las partículas. Esta película de agua puede llenar los huecos entre ellas, lo que resulta en el aumento de la densidad aparente del polvo (Mendoza-Corvis y col., 2016).

### Inhibición antifúngica *in vitro* del extracto de *R. monantha* encapsulado

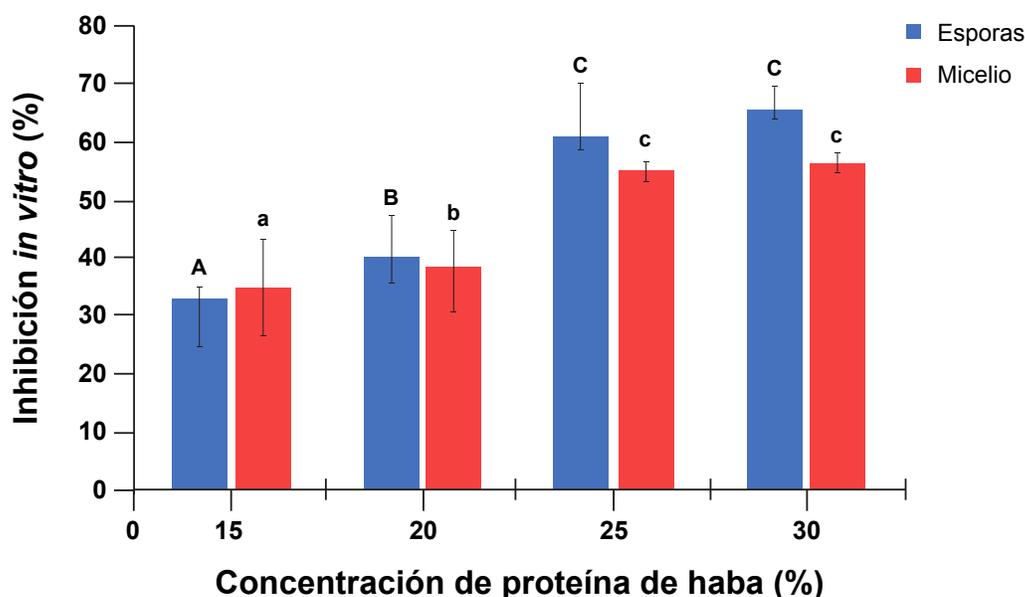
A medida que la concentración de proteína incrementó, se registró un aumento del porcentaje de inhibición ( $P < 0.05$ ), con mayor efecto en la inhibición de la germinación de esporas que en la inhibición del crecimiento micelial (Figura 3). Lo anterior puede atribuirse al estado fisiológico del hongo; en el caso del micelio, la inhibición fue menor, debido a que el hongo se encuentra en su estado

activo, en una etapa de desarrollo más avanzada y con una pared celular más resistente (Iñiguez-Moreno y col., 2020). Esta característica le confiere una mayor resistencia frente a factores externos, lo que dificulta la acción de los compuestos fenólicos. Por el contrario, las esporas representan una de las primeras etapas del ciclo de vida del hongo y requieren germinar primero para iniciar el desarrollo del micelio.

Las esporas son más sensibles a los compuestos fenólicos debido a su menor desarrollo estructural. En este sentido, la escopoletina y la quercetina pueden interferir directamente en la inhibición de la germinación de esporas (Beyer y col., 2019). Sin embargo, las cápsulas con 25 % de proteína presentaron una inhibición del 60.54 % y 55.03 % con esporas y micelio, respectivamente, que no fueron significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ) a las obtenidas con 30 % de proteína (65.4 % y 55.23 %, con esporas y micelio, respectivamente), indicando que ambas concentraciones presentaron una capacidad similar para inhibir el hongo *C. gloeosporioides*.

El incremento en la capacidad de inhibición del hongo, asociado con una mayor concentración proteica, podría deberse a la formación de una cápsula con una pared más gruesa y estructurada, lo que induce una mayor protección de los CAVBs. De acuerdo con Ramos y col. (2022) la proteína crea una barrera mediante enlaces intermoleculares, lo que resulta en una mayor eficiencia de encapsulación utilizando concentraciones más altas de polímero.

Vilchis-Gómez y col. (2024) utilizaron un extracto etanólico de *R. monantha* para inhibir el hongo *C. gloeosporioides* y atribuyeron la actividad antifúngica del extracto a los compuestos fenólicos, como la escopoletina y la quercetina, que son capaces de interferir con la estructura de la pared celular del hongo y modificar su permeabilidad. Se ha establecido que la escopoletina aumenta la permeabilidad de la membrana celular fúngica, debido a la explosión de especies reactivas de oxígeno (ROS,



■ Figura 3. Efecto inhibitorio del extracto de *R. monantha* encapsulado con proteína de haba al 15 %, 20 %, 25 % y 30 % frente a *C. gloeosporioides* utilizando esporas y micelio. Cada barra representa la media y las líneas verticales la desviación estándar. Los valores medios con la misma letra minúscula y los valores medios con la misma letra mayúscula indican que no existe diferencia significativa entre los tratamientos según la prueba LSD de Fisher ( $P < 0.05$ ).

Figure 3. Inhibitory effect of the *R. monantha* extract encapsulated with 15 %, 20 %, 25 %, and 30 % of faba bean protein against *C. gloeosporioides* using spores and mycelium. Each bar represents the mean and the vertical lines the standard deviation. Mean values with the same lowercase letter and mean values with the same uppercase letter indicate that there is no significant difference between treatments according to Fisher's LSD test ( $P < 0.05$ ).

por sus siglas en inglés: reactive oxygen species) que dañan la membrana celular (Beyer y col., 2019). Las ROS como el peróxido de hidrógeno, el radical superóxido y el radical hidroxilo, incrementan significativamente su concentración dentro de las células fúngicas en respuesta al estrés oxidativo inducido por compuestos fenólicos. Al interactuar entre sí y con componentes celulares, como proteínas y ácidos nucleicos, las ROS generan daños en los lípidos de la membrana celular, lo que compromete su integridad estructural y funcional, provocando la apoptosis del hongo (Castano-Duque y col., 2024). Por otro lado, la quercetina puede interferir con la síntesis de la pared celular y alterar la permeabilidad de la membrana celular de los hongos fitopatógenos, causando la fuga de micronutrientes de la célula y finalmente la lisis (Aguilar-Veloz y col., 2020).

Ambos compuestos son susceptibles a cambios estructurales por efecto de la temperatura y la radiación UV, que disminuyen su efecto antifúngico (Vilchis-Gómez y col., 2024), por lo que es importante desarrollar estrategias de fotoprotección, como el encapsulamiento.

## CONCLUSIONES

El secado por aspersion de la proteína de haba fue adecuado para la encapsulación del extracto de *R. monantha*. El uso de 30 % de proteína de haba permitió obtener alta eficiencia de encapsulación (70.15 %) y muy buenas propiedades termoprotectoras ( $\sim 78.24$  °C) y fotoprotectoras (10 % de oxidación relativa) sobre los CAVBs del extracto. Estas cápsulas preservaron la capacidad antifúngica *in vitro* del extracto, por lo que fueron adecuadas para el control de *C. gloeosporioides*, con una

inhibición de la germinación de esporas del 65.4 %. Además, presentaron calidad físico-química adecuada en cuanto a actividad de agua, solubilidad, higroscopicidad y densidad aparente, lo que sugiere su uso potencial en campo. Las características de estabilidad del encapsulado posicionan a la proteína de haba como una alternativa prometedora para ser utilizada como material encapsulante en otras sustancias bioactivas, con aplicaciones en la industria alimenticia y farmacéutica, en función de las propiedades biológicas de los compuestos que se busque proteger.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada a Claudia Marcela Guillén-Jiménez para la realización de este trabajo.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

## REFERENCIAS

- Aguilar-Veloz, L. M., Calderón-Santoyo, M., Vázquez-González, Y., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2020). Application of essential oils and polyphenols as natural antimicrobial agents in postharvest treatments: Advances and challenges. *Food Science & Nutrition*, 8(6), 2555-2568. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1437>
- Alehosseini, A., Ghorani, B., Sarabi-Jamab, M., & Tucker, N. (2018). Principles of electrospraying: A new approach in protection of bioactive compounds in foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(14), 2346-2363. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1323723>
- Alpizar-Reyes, E., Castaño, J., Carrillo-Navas, H., Alvarez-Ramírez, J., Gallardo-Rivera, R., Pérez-Alonso, C., & Guadarrama-Lezama, A. Y. (2018). Thermodynamic sorption analysis and glass transition temperature of faba bean (*Vicia faba* L.) protein. *Journal of Food Science and Technology*, 55(3), 935-943. [doi:10.1007/s13197-017-3001-1](https://doi.org/10.1007/s13197-017-3001-1)
- Beyer, S. F., Beesley, A., Rohmann, P. F., Schultheiss, H., Conrath, U., & Langenbach, C. J. (2019). The *Arabidopsis* non-host defence-associated coumarin scopoletin protects soybean from asian soybean rust. *The Plant Journal*, 99(3), 397-413. <https://doi.org/10.1111/tpj.14426>
- Calderón-Santoyo, M., Iñiguez-Moreno, M., Barros-Castillo, J. C., Miss-Zacarías, D. M., Díaz, J. A., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2022). Microencapsulation of citral with Arabic gum and sodium alginate for the control of *Fusarium pseudocircinatum* in bananas. *Iranian Polymer Journal*, 31(5), 665-676. <https://doi.org/10.1007/s13726-022-01033-z>
- Castano-Duque, L., Lebar, M. D., Mack, B. M., Lohmar, J. M., & Carter-Wientjes, C. (2024). Investigating the impact of flavonoids on *Aspergillus flavus*: Insights into cell wall damage and biofilms. *Journal of Fungi*, 10(9), 665. <https://doi.org/10.3390/jof10090665>
- Chamudeshwari, J., Parthasarathi, S., & Ali, R. (2024). Chapter 4 - Spray drying of milk and milk products. In S. Mahdi-Jafari & K. Samborska (Eds.), *Spray drying for the food industry* (pp. 87-123). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819799-8.00002-8>
- Dissanayake, T. & Bandara, N. (2024). Protein-based encapsulation systems for codelivery of bioactive compounds: Recent studies and potential applications. *Current Opinion in Food Science*, 57, 101181. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101181>
- Dumitraşcu, L., Stănciuc, N., & Aprodu, I. (2021). Encapsulation of anthocyanins from cornelian cherry fruits using heated or non-heated soy proteins. *Foods*, 10(6), 1342. <https://doi.org/10.3390/foods10061342>
- Duodu, K. G. & Apea-Bah, F. B. (2017). African legumes: Nutritional and health-promoting attributes. In R. N. John & J. M. Taylor (Eds.), *Gluten-Free ancient grains* (pp. 223-269). Elsevier. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021). Cultivos y productos de ganadería. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>. Fecha de consulta: 16 de mayo de 2023.
- Fatnassi, M., Tourné-Péteilh, C., Peralta, P., Cac-

- ciaguerra, T., Dieudonné, P., Devoisselle, J. M., & Alonso, B. (2013). Encapsulation of complementary model drugs in spray-dried nanostructured materials. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 68(2), 307-316. <https://doi.org/10.1007/s10971-013-3170-y>
- Gabas, A. L., Telis-Romero, J., Giraldo-Gómez, G. I., & Telis, V. R. N. (2009). Propiedades termodinámicas de sorción de agua de la pulpa de lulo en polvo con encapsulantes. *Food Science and Technology*, 29(4), 911-918. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612009000400032>
- Gatto, M. A., Ippolito, A., Linsalata, V., Cascarano, N. A., Nigro, F., Vanadia, S., & Di-Venere, D. (2011). Activity of extracts from wild edible herbs against postharvest fungal diseases of fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 61(1), 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.02.005>
- Gharsallaoui, A., Saurel, R., Chambin, O., & Voilley, A. (2012). Pea (*Pisum sativum*, L.) protein isolate stabilized emulsions: A novel system for microencapsulation of lipophilic ingredients by spray drying. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 2211-2221. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0497-z>
- González-Cruz, E., Andrade-Gonzales, I., Prieto, C., Calderón-Santoyo, M., & Ragazzo-Sánchez, J. (2022). Nanoencapsulation of polyphenolic-rich extract from biloxi blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) by electrospraying using zein as encapsulating material. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(1), 78. <https://doi.org/10.33263/BRIAC131.078>
- González-Gutiérrez, K. N., Ragazzo-Sánchez, J. A., Barros-Castillo, J. C., Narváez-Zapata, J. A., & Calderón-Santoyo, M. (2023). Yeasts with potential biocontrol of *Colletotrichum gloeosporioides* in avocado (*Persea americana* Mill. cv. Hass) and characterization of *Yamadazyma mexicana* mechanisms. *European Journal of Plant Pathology*, 165(3), 525-543. <https://doi.org/10.1007/s10658-022-02625-4>
- González-Gutiérrez, K. N., Ragazzo-Sánchez, J. A., & Calderón-Santoyo, M. (2024). Bioformulation of *Yamadazyma mexicana* LPa14 by electrospraying process: Anthracnose control and effect on postharvest quality of avocado fruit. *Biological Control*, 190, 105449. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105449>
- Hacisalihoglu, G., Freeman, J., Armstrong, P. R., Seabourn, B. W., Porter, L. D., Settles, A. M., & Gustin, J. L. (2020). Protein, weight, and oil prediction by single-seed near-infrared spectroscopy for selection of seed quality and yield traits in pea (*Pisum sativum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(8), 3488-3497. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10389>
- Iñiguez-Moreno, M., Calderón-Santoyo, M., Barros-Castillo, J. C., Miss-Zacarías, D. M., Díaz, J. A., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2022). Nanofibers added with citral: Characterization and their application to postharvest control of *Fusarium pseudocircinatum* in bananas. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(12). <https://doi.org/10.1111/jfpp.17188>
- Iñiguez-Moreno, M., Ragazzo-Sánchez, J. A., Barros-Castillo, J. C., Sandoval-Contreras, T., & Calderón-Santoyo, M. (2020). Sodium alginate coatings added with *Meyerozyma caribbica*: Postharvest biocontrol of *Colletotrichum gloeosporioides* in avocado (*Persea americana* Mill. cv. Hass). *Postharvest Biology and Technology*, 163, 111123. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111123>
- Ismail, B. P., Senaratne-Lenagala, L., Stube, A., & Brackenridge, A. (2020). Protein demand: Review of plant and animal proteins used in alternative protein product development and production. *Animal Frontiers*, 10(4), 53-63. <https://doi.org/10.1093/af/vfaa040>
- Jiménez-Sánchez, D. E., Calderón-Santoyo, M., Ortiz-Basurto, R. I., Bautista-Rosales, P. U., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2018). Effect of maltodextrin reduction and native agave fructans addition on the physicochemical properties of spray-dried mango and pineapple juices. *Food Science and Technology International*, 24(6), 519-532. <https://doi.org/10.1177/1082013218769168>
- Juárez-Trujillo, N., Monribot-Villanueva, J. L., Alvarado-Olivarez, M., Luna-Solano, G., Guerrero-Analco, J. A., & Jiménez-Fernández, M. (2018). Phenolic profile and antioxidative properties of pulp and seeds of *Randia monantha* Benth. *Industrial Crops and Products*, 124, 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.052>
- Karkanis, A., Ntatsi, G., Lepse, L., Fernández, J. A., Vågen, I. M., Rewald, B., Alsina, I., Kronberga, A., Balliu, A., Olle, M., Bodner, G., Dubova, L., Rosa, E., & Savvas, D. (2018). Faba bean cultivation – Revealing novel managing practices for more sustainable and competitive European cropping Systems. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01115>

- Kumar, M., Tomar, M., Punia, S., Dhakane-Lad, J., Dhumal, S., Changan, S., Senapathy, M., Berwal, M. K., Sampathrajan, V., Sayed, A. A. S., Chandran, D., Pandiselvam, R., Rais, N., Mahato, D. K., Udikeri, S. S., Satankar, V., Anitha, T., Reetu, R., & Kennedy, J. F. (2022). Plant-based proteins and their multifaceted industrial applications. *LWT- Food Science and Technology*, 154, 112620. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112620>
- López-Cruz, R., Ragazzo-Sánchez, J. A., & Calderón-Santoyo, M. (2020). Microencapsulation of *Meyerozyma guilliermondii* by spray drying using sodium alginate and soy protein isolate as wall materials: A biocontrol formulation for anthracnose disease of mango. *Biocontrol Science and Technology*, 30(10), 1116-1132. <https://doi.org/10.1080/09583157.2020.1793910>
- Mahdi-Jafari, S. (2017). An overview of nanoencapsulation techniques and their classification. In S. Mahdi-Jafari (Ed.), *Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries* (pp. 1-34). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809436-5.00001-X>
- Malloum, A. & Conradie, J. (2023). Microsolvation of phenol in water: Structures, hydration free energy and enthalpy. *Molecular Simulation*, 49(4), 403-414. <https://doi.org/10.1080/08927022.2022.2163674>
- Mariscal-Amaro, L. A., Villaseñor-Mir, H. E., Solís-Moya, E., Hortelano-Santa Rosa, R. y Martínez-Cruz, E. (2020). Efecto de fungicidas sobre caracteres agronómicos, rendimiento y tizones foliares en trigo de temporal en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(1), 71. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.71>
- Méndez-Ventura, L. y Hernández-Medel, M. (2009). Evaluación de la toxicidad del fruto de *Randia monantha Benth.* *Revista Médica de la Universidad Veracruzana*, 9(1), 41-45.
- Mendoza-Corvis, F., Arteaga-Martinez, M. y Perez-Solis, O. (2016). Comportamiento de la vitamina c en un producto a base de lactosuero y pulpa de mango variedad magdalena river (*Mangifera indica* L.) durante el secado por aspersión. *Revista Chilena de Nutrición*, 43(2), 8. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182016000200008>
- Meng, Y. & Zhang, X. (2014). Nanostructure formation in Thermoset/Block copolymer and Thermoset/Hyperbranched polymer blends. In S. Thomas, R. Shanks & S. Chandrasekharakurup (Eds.), *Nanostructured Polymer Blends* (pp. 161-194). Elsevier, London.
- Ojeda-Ayala, M., Gaxiola-Camacho, S. M., & Delgado-Vargas, F. (2022). Phytochemical composition and biological activities of the plants of the genus *Randia*. *Botanical Sciences*, 100(4), 779-796. <https://doi.org/10.17129/botsci.3004>
- Oulahal, N. & Degraeve, P. (2022). Phenolic-rich plant extracts with antimicrobial Activity: An alternative to food preservatives and biocides? *Frontiers in Microbiology*, 12(1). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.753518>
- Pandit, M. A., Kumar, J., Gulati, S., Bhandari, N., Mehta, P., Katyaj, R., Rawat, C. D., Mishra, V., & Kaur, J. (2022). Major biological control strategies for plant pathogens. *Pathogens*, 11(2), 273. <https://doi.org/10.3390/pathogens11020273>
- Ramos-Hernández, J. A., Calderón-Santoyo, M., Prieto, C., Lagarón, J. M., Navarro-Ocaña, A., & Ragazzo-Sanchez, J. A. (2023). Encapsulation with HDPAF-WP of the hexane fraction of sea grape (*Coccoloba uvifera* L.) leaf extract by electrospraying. *Polymer Bulletin*, 80(1), 959-975. [10.1007/s00289-022-04088-3](https://doi.org/10.1007/s00289-022-04088-3)
- Ramos-Hernández, J. A., Lagarón, J. M., Calderón-Santoyo, M., Prieto, C., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2021). Enhancing hygroscopic stability of agave fructans capsules obtained by electrospraying. *Journal of Food Science and Technology*, 58(4), 1593-1603. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04672-3>
- Ramos, R., Bernard, J., Ganachaud, F., & Miserez, A. (2022). Protein-based encapsulation strategies: Toward micro- and nanoscale carriers with increased functionality. *Small Science*, 2(3). <https://doi.org/10.1002/smssc.202100095>
- Rodiño, P., Santalla, M., De-Ron M, A., & Drevon-Jacques, J. (2005). Variability in symbiotic nitrogen fixation among white landraces of common bean from the Iberian peninsula. *Symbiosis*, 2, 69-78.
- Saldanha-do-Carmo, C., Knutsen, S. H., Malizia, G., Dessev, T., Geny, A., Zobel, H., Myhrer, K. S., Varela, P., & Sahlstrøm, S. (2021). Meat analogues from a faba bean concentrate can be generated by high moisture extrusion. *Future Foods*, 3, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100014>
- Sarabandi, K., Sadeghi-Mahoonak, A., Hamishekar, H., Ghorbani, M., & Jafari, S. M. (2018). Microencapsulation of casein hydrolysates: Physicoche-

- mical, antioxidant and microstructure properties. *Journal of Food Engineering*, 237, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.036>
- Schumacher, H., Paulsen, H. M., Gau, A. E., Link, W., Jürgens, H. U., Sass, O., & Dieterich, R. (2011). Seed protein amino acid composition of important local grain legumes *Lupinus angustifolius* L., *Lupinus luteus* L., *Pisum sativum* L. and *Vicia faba* L. *Plant Breeding*, 130(2), 156-164. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2010.01832.x>
- Selim, K. A., Alharthi, S. S., Abu El-Hassan, A. M., Elneairy, N. A., Rabee, L. A., & Abdel-Razek, A. G. (2021). The effect of wall material type on the encapsulation efficiency and oxidative stability of fish oils. *Molecules*, 26(20), 6-19. <https://doi.org/10.3390/molecules26206109>
- Simonetti, G., Brasili, E., & Pasqua, G. (2020). Antifungal activity of phenolic and polyphenolic compounds from different matrices of *Vitis vinifera* L. against human pathogens. *Molecules*, 25(16), 37-48. <https://doi.org/10.3390/molecules25163748>
- Stampfli, A. R. & Seebeck, F. P. (2020). The catalytic mechanism of sulfoxide synthases. *Current Opinion in Chemical Biology*, 59(1), 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.06.007>
- Suárez, H. M. y Brito, D. C. (2020). Eficiencia de encapsulación y capacidad de carga de antocianinas de *Vaccinium floribundum* kunt en nanopartículas de zeína. *Infoanalítica*, 8(1), 83-97. <https://doi.org/10.26807/ia.v8i1.98>
- Ulfa, A. S., Emelda, E., Munir, M. A., & Sulistyani, N. (2023). Pengaruh metode ekstraksi maserasi dan sokletasi terhadap standardisasi parameter spesifik dan non spesifik ekstrak etanol biji pepaya (*Carica papaya* L.). *Jurnal Insan Farmasi Indonesia*, 6(1), 1-12. <https://doi.org/10.36387/jifi.v6i1.1387>
- Vilchis-Gómez, D. S., Calderón-Santoyo, M., Barros-Castillo, J. C., Zamora-Gasga, V. M., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2024). Ultrasound assisted extraction of polyphenols from *Randia monantha*: Optimization, characterization and antifungal activity. *Industrial Crops and Products*, 209, 117932. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117932>
- Wang, Y., Ghosh, S., & Nickerson, M. T. (2022). Microencapsulation of flaxseed oil by lentil protein isolate - $\kappa$ -carrageenan and - $\iota$ -carrageenan based wall materials through spray and freeze drying. *Molecules*, 27, 3195. <https://doi.org/10.3390/molecules27103195>
- Warsame, A. O., Michael, N., O'Sullivan, D. M., & Tosi, P. (2020). Identification and quantification of major faba bean seed proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(32), 8535-8544. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02927>
- Wu, Z., Wu, Y., Zakhvatayeva, A., Wang, X., Liu, Z., Yang, M., Zheng, Q., & Wu, C. Y. (2022). Influence of moisture content on the filling of pharmaceutical powders. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 78, 103985. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103985>
- Yan, C., Kim, S. R., Ruiz, D. R., & Farmer, J. R. (2022). Microencapsulation for food applications: A review. *ACS Applied Bio Materials*, 5(12), 5497-5512. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00673>
- Zhu, J. & Huang, Q. (2019). Nanoencapsulation of functional food ingredients. In T. Mingquian (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research* (pp.129-165). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.03.005>
- Żmudziński, D., Goik, U., & Ptaszek, P. (2021). Functional and rheological properties of *Vicia faba* L. protein isolates. *Biomolecules*, 11(2), 178. <https://doi.org/10.3390/biom11020178>



Imágenes de: José Ignacio Olave Leyva,  
Nidia Aréchiga Ceballos

# La rabia paralítica bovina en el estado de Tamaulipas desde la perspectiva de la distribución de su principal reservorio, el vampiro común (*Desmodus rotundus*)

## Bovine paralytic rabies in the state of Tamaulipas from the perspective of the distribution of its main reservoir, the common vampire bat (*Desmodus rotundus*)

José Ignacio Olave-Leyva<sup>1,2</sup>, Julio Martínez-Burnes<sup>1</sup>, Leroy Soria-Díaz<sup>1,3</sup>, Álvaro Aguilar-Setién<sup>4</sup>, Nidia Aréchiga-Ceballos<sup>5</sup>

### RESUMEN

La rabia es la zoonosis con mayor impacto sobre herbívoros domésticos, provocando en América Latina pérdidas económicas de aproximadamente 97 millones de dólares anuales. En esta región, el vampiro común (*Desmodus rotundus*) es un reservorio del virus de la rabia y se considera su principal transmisor al ganado. El objetivo de este estudio fue analizar la progresión de la rabia paralítica bovina (RPB) y su asociación con la presencia y distribución de *D. rotundus* en Tamaulipas, México, en función de factores ambientales (características ecológicas y geográficas) que lo favorecen. Se analizó la distribución anual de casos detectados de RPB en Tamaulipas por municipio durante 1999 a 2020. La distribución espacial del murciélago *D. rotundus* se estudió considerando las características biológicas de la especie, así como las de Tamaulipas. La RPB, asociada a *D. rotundus* mediante tipificación de la variante antigénica del virus, se presentó en 28 de los 43 municipios que comprende el estado, con marcada tendencia a expandirse desde el sur hacia el norte de la entidad. La ecorregión bosque húmedo veracruzano concentró el mayor número de casos de RPB y presencia del vampiro, ambos factores se vieron influenciados por diferentes tipos de vegetación como áreas agrícolas, pastizales y selvas. La tendencia observada en los últimos 10 años, de avanzar hacia el norte del estado de parte de *D. rotundus* y los brotes de casos de RPB en esas zonas, sugieren la posibilidad de que la especie expanda su distribución hacia los Estados Unidos de América, país actualmente considerado libre de la presencia del organismo, principalmente hacia el estado vecino de Texas, debido a que sus características geográficas y ecológicas son similares a las de la entidad analizada.

**PALABRAS CLAVE:** cambio climático, *Desmodus rotundus*, rabia, Tamaulipas, zoonosis.

### ABSTRACT

Rabies is the zoonosis with the most significant impact on domestic herbivores, causing economic losses of approximately 97 million dollars annually in Latin America. In this region, the common vampire (*Desmodus rotundus*) is a reservoir of the rabies virus and is considered its main transmitter to livestock. The objective of this study was to analyze the progression of bovine paralytic rabies (BPR) and its association with the presence and distribution of *D. rotundus* in Tamaulipas, Mexico, focusing on the environmental factors (ecological and geographical characteristics) that favor it. Municipalities' annual distribution of detected cases of BPR in Tamaulipas from 1999 to 2020 was analyzed. The spatial distribution of the bat *D. rotundus* was studied considering the biological characteristics of the species, as well as those of Tamaulipas. BPR, associated with *D. rotundus* through typification of the antigenic variant of the virus, occurred in 28 of the 43 municipalities comprising the state, with a marked tendency to expand itself from the south to the north. The Veracruz humid forest ecoregion concentrated the highest number of cases of BPR and the presence of the vampire. Both factors were influenced by different types of vegetation, such as agricultural areas, pastures, and jungles. The trend observed in the last 10 years of advancing towards the north of the state on the part of *D. rotundus* and the outbreaks of RPB cases in those areas suggests that the species is likely to expand its distribution to the United States of America, a country currently considered free of the presence of the organism, mainly to the neighboring state of Texas, because its geographical and ecological characteristics are similar to those of the state analyzed.

**KEYWORDS:** climate change, *Desmodus rotundus*, rabies, Tamaulipas, zoonoses.

\*Correspondencia: [nidia.arechiga@salud.gob.mx](mailto:nidia.arechiga@salud.gob.mx)/Fecha de recepción: 21 de mayo de 2024/Fecha de aceptación: 15 de noviembre de 2024/Fecha de publicación: 24 de enero de 2025.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Tamaulipas, Instituto de Ecología Aplicada, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, C. P. 87019. <sup>2</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, área Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Hidalgo, México, C. P. 43775. <sup>3</sup>Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, C. P. 8727. <sup>4</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad de Posgrado, Coyoacán, Ciudad de México, México, C. P. 04510. <sup>5</sup>Secretaría de Salud, Dirección General de Epidemiología, Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológicos, Francisco de P. Miranda, núm. 157, col. Unidad Lomas de Plateros, Alcaldía Álvaro Obregón, Ciudad de México, México, C. P. 01480.

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de las enfermedades infecciosas emergentes y reemergentes que afectan al ser humano son zoonóticas y están causadas por virus originarios de mamíferos silvestres (Olivall y col., 2017). Las zoonosis víricas son una grave amenaza para la salud pública y la seguridad mundial, y han causado la mayoría de las pandemias recientes, como lo fue la de COVID-19 (Jori y col., 2021).

La rabia paralítica bovina (RPB) es una de las enfermedades zoonóticas con mayor impacto sobre los herbívoros domésticos, con una mortalidad de alrededor de 100 000 individuos por año y que provoca pérdidas económicas anuales de 97 millones de dólares en América Latina (Benavides y col., 2020). Es causada por el virus de la rabia, y fue descrita por primera vez en el continente americano a mediados del siglo XX. Los murciélagos conocidos como vampiros comunes (*Desmodus rotundus*) son de gran importancia en la transmisión a otras especies (Acha y col., 1968; Battalla-Campero y Flores-Crespo, 1998).

Actualmente, están descritas más de 1 400 especies de murciélagos en el mundo, de las cuales únicamente tres tienen hábitos hematófagos (Burgin y col., 2018; Simmons y Cirraneillo, 2022). En México, existen cerca de 140 especies de este grupo de mamíferos, incluyendo las tres especies hematófagas (Sil-Berra y col., 2022): *Diaemus youngi* (murciélago vampiro de alas blancas) y *Diphylla ecaudata* (murciélago de patas peludas) presentan hábitos alimenticios especializados, consumiendo preferencialmente sangre fresca de aves (Scheffer y col., 2015), y el vampiro común *D. rotundus*, la única con una participación importante en la epidemiología del virus de la rabia, ya que su fuente primaria de alimento es la sangre de mamíferos.

En Latinoamérica, *D. rotundus* es el principal reservorio y transmisor del virus rábico que afecta al ganado y al ser humano (Brown y Escobar, 2023). Habita en zonas tropicales y subtropicales del continente, por la vertiente

del Pacífico desde el sur de Sonora; y por el lado del Golfo de México, desde el noreste de Tamaulipas y Nuevo León; hacia el sur, llega hasta el sur de Chile, norte de Argentina y Uruguay. También se puede encontrar en las islas Margarita y Trinidad y Tobago. Dentro de los factores ambientales que influyen en la distribución de *D. rotundus* y el riesgo de rabia a gran escala espacial se incluyen la temperatura, la altitud y la precipitación (Botto-Nuñez y col., 2020). Actualmente, existe la preocupación de que el cambio climático facilite la llegada de esta especie al sur de Estados Unidos de América (EUA) (Bodenchuk y Bergman, 2020).

La presencia de *D. rotundus*, su capacidad como reservorio del virus rábico (RVR), así como sus hábitos alimenticios, son los principales factores de riesgo para que la rabia sea transmitida en las especies ganaderas y el ser humano (Meza y col., 2022; Viana y col., 2023). En México, del 2000 al 2022 se han reportado 50 casos de rabia humana, de los cuales 44 (88 %) fueron transmitidos por animales silvestres (quirópteros y zorrillos principalmente) y solo cuatro (8 %) por perro y dos por gato (4 %) (Aréchiga-Ceballos y col., 2022).

En el estado de Tamaulipas se distribuyen, de manera natural, 57 especies de murciélagos (Arriaga-Flores, 2010), entre las cuales están presentes las tres especies hematófagas *D. youngi*, *D. ecaudata* y *D. rotundus*, este último, considerado el principal RVR que afecta a las especies ganaderas. La ganadería es una de las actividades económicas más importantes en el estado y se caracteriza por la crianza de ganado bovino, de acuerdo con el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP-SIACON, 2023).

En Tamaulipas, la actividad ganadera enfocada a la crianza de ganado bovino se desarrolla en 28 municipios principalmente y, en el año 2021, contaba con una población total de 1 210 055 cabezas de ganado bovino provenientes de 17 924 unidades de producción (SIAP-SIACON, 2023). Los municipios

que destacan por su producción de carne de bovino son: Jiménez, Soto La Marina, Aldama, González, Ciudad Victoria y Altamira. El ganado ovino también representa una fuente de ingresos en Tamaulipas, con San Fernando, Méndez, Reynosa, Hidalgo, Ciudad Victoria, Villagrán y Burgos, como los principales municipios productores. Además, existe un gran potencial para la crianza de especies zootécnicas en la zona semiárida y árida del estado, especialmente el ganado caprino, que se adapta bien a las condiciones de vegetación y clima en la región del altiplano y el valle de San Fernando. En el 2022, Tamaulipas obtuvo una producción de 46 166 T de carne de bovino, 1 464 T de carne de ovino y 1 525 T carne de caprino (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2023).

El primer registro de rabia en bovinos en Tamaulipas confirmado por laboratorio fue en 1994, como consecuencia de un brote que se produjo en un rancho ganadero cercano a la localidad de Aldama, situada a unos 340 km al sur de la frontera de Texas, EUA., y a 10 km del Golfo de México. Los signos clínicos en el ganado afectado consistían en fiebre, fotofobia, ptialismo, incoordinación, seguida de postración, parálisis y pérdida de sensibilidad cutánea. El diagnóstico se realizó por histopatología e inmunofluorescencia directa (IFD) (la prueba estándar de oro). Los resultados del estudio de laboratorio confirmaron que la especie transmisora fue el murciélago vampiro, mediante la caracterización a través de un panel de anticuerpos monoclonales, identificando una variante del virus rábico, por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y Texas Department of Health en Austin, Texas, EUA (Martínez-Burnes y col., 1997).

Dado que la rabia no se había presentado en la zona en los últimos 25 años (desde 1994), no se practicaba la vacunación, a pesar de que los murciélagos vampiro eran comunes en la región (Batalla-Campero y Flores Crespo, 1998). A partir del primer brote de rabia

bovina se declaró la circulación del virus rábico en las poblaciones de murciélagos hematófagos en Tamaulipas, la cual se ha registrado desde el sur del estado hacia la parte centro, norte y noreste de Tamaulipas (Martínez-Burnes y col., 1997).

Al ser la RPB una enfermedad de reporte obligatorio en el estado de Tamaulipas, le corresponde tomar acciones al Comité Para el Fomento y Protección Pecuaria de Tamaulipas A. C. (CFPPT), organismo auxiliar de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) y del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). El CFPPT, opera la “Campaña Nacional para la Prevención y control de la rabia en bovinos y especies ganaderas”, de acuerdo a la NOM-067-ZOO-2007 (2007), realizando dos actividades sustantivas; la vacunación del ganado y atención de casos, así como los operativos para el control del tamaño de población de *D. rotundus*, mediante las capturas realizadas por personal capacitado. Las capturas pueden ser programadas o asociadas a un caso sospechoso de rabia; se realizan en refugio y en corral, utilizando redes de niebla. Los murciélagos hematófagos capturados son identificados e impregnados con un ungüento vampiricida, para después ser liberados, con el objetivo de controlar el tamaño de la población; lo cual sucede cuando el organismo liberado contamina con el ungüento a otros especímenes por contacto, quienes a su vez lo ingerirán mediante acciones de limpieza de su cuerpo, lo que causa la muerte en un lapso de 3 a 5 días debido al efecto anticoagulante. Esta técnica se realiza desde la década de los años 70 en México (Flores-Crespo, 1998).

De acuerdo con la base de datos generada por el sistema de información sobre biodiversidad GBIF.org (2021) (GBIF, por sus siglas en inglés: Global Biodiversity Information Facility), en Tamaulipas, los registros de *D. rotundus* en el periodo de 1949 a 2007 fueron de 445 individuos, distribuidos en los municipios de Gómez Farías, Antigua Morelos, Ciudad Victoria, Jaumave, Llera de Canales,

Mante, Soto la Marina, González, Padilla, Matamoros, San Nicolás y San Carlos. Sus informes indican la presencia de *D. rotundus* en el estado antes de que se originaran los primeros brotes de rabia en el ganado transmitidos por esta especie.

En el año 2016, en el municipio de Soto La Marina (Ejido 8 de mayo), Tamaulipas, México, se registró el único caso de rabia humana transmitido por vampiro. La agresión la sufrió un hombre de 39 años, en la rodilla derecha, el día 5 de septiembre, y tras padecer un cuadro clínico complicado y recibir tratamiento antirrábico (vacuna e inmunoglobulina antirrábica humana) cuando ya había comenzado el cuadro clínico, el paciente falleció el día 19 de octubre. El Laboratorio Estatal de Salud Pública del Estado de Tamaulipas (LESP) reportó resultado positivo de muestra encefálica el 21 de octubre por IFD, y el Laboratorio de Rabia del Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológica (InDRE) caracterizó el caso con la variante antigénica 11 (AgV11, por sus siglas en inglés: antigenic variants), cuyo reservorio es el murciélago vampiro *D. rotundus* (SSA, 2020; SIRVERA, 2024).

El objetivo del presente estudio fue describir y analizar la historia de la progresión de la rabia parálitica bovina, la distribución de su principal reservorio (*D. rotundus*) en el estado de Tamaulipas, así como de algunos factores ambientales que favorecen la presencia de esta especie y la transmisión de la enfermedad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2023), Tamaulipas tiene un territorio de 80 175 km<sup>2</sup>. Se divide en 43 municipios, con una población de 3 527 735 habitantes. Está situado en la región noreste de México; al norte de la llanura costera del golfo y en la Sierra Madre Oriental, entre las coordenadas 24°17'14" N y 98°33'48" W; colinda por el norte con el Río Bravo que lo separa de los EUA.; por el este con el Golfo de México (océano Atlántico);

por el oeste con Nuevo León; al sur con Veracruz; y suroeste con San Luis Potosí.

El 58 % del estado presenta clima cálido subhúmedo, el 38 % clima seco y semi-seco en el centro, el norte y hacia el suroeste del estado; el 2 % es templado subhúmedo en la región suroeste, y el 2 % presenta clima cálido húmedo localizado hacia el suroeste. La temperatura media anual es alrededor de 23.5 °C, la temperatura máxima promedio de 22 °C y se registra en los meses de junio a agosto. La temperatura mínima promedio es de 10 °C y se presenta en el mes de enero. La precipitación media estatal es de 780 mm anuales, las lluvias se registran en verano en los meses de junio a septiembre (INEGI, 2023).

### Análisis eco-epidemiológicos

Los registros de presencia de *D. rotundus* se obtuvieron a través del GBIF, SENASICA y de registros generados en los operativos realizados por el CFPPT para la prevención y control de la rabia, y el murciélago hematófago, de acuerdo a la NOM-067-ZOO-2007 (2007), "Campaña Nacional para la Prevención y control de la rabia en bovinos y especies ganaderas". Posteriormente, los reportes de avistamientos georreferenciados fueron filtrados siguiendo a Cobos y col. (2019), eliminando duplicados, posibles errores de identificación o incertidumbre en las coordenadas, implementando un umbral espacial (*spatial thin*) de 5 km.

Con la base de datos del Laboratorio de Rabia del InDRE y la generada en este estudio, se relacionaron los casos positivos a rabia en bovinos que fueron agredidos por *D. rotundus*, y se seleccionaron aquellos que contaran con datos de la localidad, y que se les haya determinado la AgV. La caracterización antigénica es una técnica de inmunofluorescencia indirecta que emplea un panel de anticuerpos monoclonales y se aplica en muestras de interés epidemiológico, para determinar la especie reservorio más probable en cada brote (Smith, 1989; Smith y col., 1992).

## Análisis de datos

Mediante estadística descriptiva, generando gráficas, se analizó la distribución de los casos de rabia en bovinos en Tamaulipas en dos periodos, de 1999 a 2010 y 2011 a 2020; y de la distribución de los registros de presencia de *D. rotundus* en el estado de 1987 a 2019.

En Tamaulipas se han descrito siete ecorregiones, que son unidades geográficas con flora, fauna y ecosistemas característicos (Olson y col., 2001): matorral de la meseta central, manglares mesoamericanos del golfo y el Caribe, bosque de pino y encino de la Sierra Madre Oriental, matorral tamaulipeco, mezquital tamaulipeco, bosque húmedo Veracruzano y pastizales costeros del golfo occidental; pero debe considerarse que, en todas ellas es probable que exista un cambio en el uso de suelo para desarrollo de actividades antropogénicas. En el presente estudio, se realizó una descripción de sus características ecológicas y geográficas relacionadas con la presencia de *D. rotundus* y los casos de RPB en Tamaulipas.

Se utilizó, además, un Sistema de Información Geográfica (SIG) y se realizó una unión espacial de la base de datos de los registros de *D. rotundus* y los casos de RPB generados en este estudio, con los de la capa de la VI carta del uso de suelo y vegetación de Tamaulipas (INEGI, 2016) y las ecorregiones terrestres de Olson y col. (2001). Esto permitió observar la ubicación geográfica de los registros de *D. rotundus* y los casos de RPB, asociada a las características ambientales (ecorregiones y tipo de vegetación), a partir del método divisible de K medias generalizado para estimar el número de categorías y las observaciones que lo conforman.

Mediante el análisis de correlación índice de marginalidad media (OMI, por sus siglas en inglés: Outlying Mean Indexes), se compararon las condiciones ambientales promedio utilizadas para cada variable, con respecto a las condiciones promedio de cada sitio de evaluación (Dolédec y col., 2000). El OMI generó un nue-

vo sistema de referencia (eje), el cual refleja las condiciones ambientales de las observaciones que permite analizar las K medias y establecer su correlación. Finalmente, se asociaron la abundancia de los casos de RPB y la presencia de *D. rotundus* en cada uno de los sitios de observación, con las características ambientales mediante un análisis de correspondencia simple (AC) (Picard y col. 2012; Vargas-Vázquez y col., 2019). Se realizó una prueba de significancia estadística  $X^2$  independiente para cada variable ambiental.

## RESULTADOS

### Distribución y evolución de la RPB en Tamaulipas

En el periodo 1999 a 2020, de acuerdo con los datos reportados por el CFPPT y SENASICA, se presentaron 579 casos de RPB en el estado (Figura 1), lo que representa una tasa de infección del 0.05 % para el periodo estudiado, más alta que la tasa de infección a nivel nacional, la cual, se considera del orden del 0.04 % (Thrusfield, 2005).

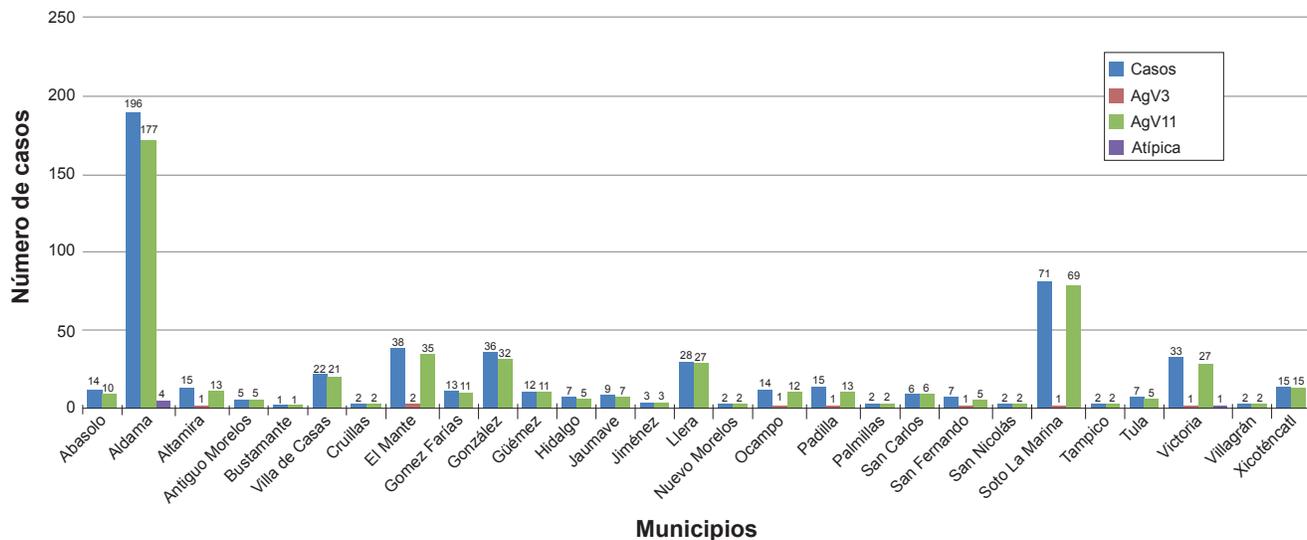
El InDRE logró tipificar las variantes antigénicas de 535 muestras de bovinos positivos a rabia, enviadas para su análisis en el periodo de 1999 a 2020 (44 muestras no tuvieron las condiciones para realizar la caracterización). Se establecieron 8 casos de infección con la variante AgV3 y 522 AgV11, ambas asociadas con *D. rotundus* como el reservorio natural (Figura 1). En el mismo periodo, el CFPPT reportó la existencia de 45 casos de rabia en otras especies ganaderas (sin reporte de la variante antigénica): 38 casos en equinos (6 %), 4 casos en ovinos (0.6 %) y 3 en caprinos (0.4 %), representando tasas de contagio muy bajas, en comparación con los casos que se presentaron en ganado bovino (93 %).

Los casos de RPB se distribuyeron en 28 municipios, con una variación en su incidencia, ya que durante el periodo 1999 a 2010 se registraron 375 casos, en tanto que, de 2011 a 2020 se presentaron solo 204 casos, indicando una disminución del 64.7 %, con un efecto de decremento de casos en 7 municipios (Figura 2).

La distribución de los casos también mostró afectación, con una marcada tendencia a expandirse, durante el segundo periodo, hacia municipios del norte del estado como Hidalgo, Cruillas y San Fernando, sugiriendo con ello, una migración del reservorio de la infección; también hubo un caso en el municipio de Bustamante, ubicado en el sur y que estuvo libre de casos en el primer periodo (Figuras 2 y 3).

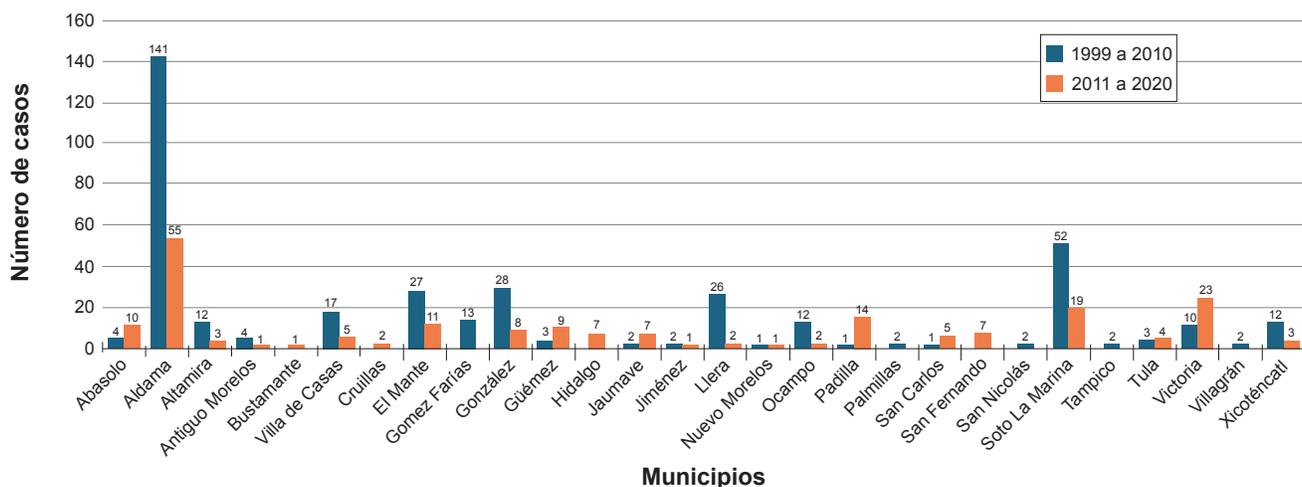
### Asociación de la distribución de *D. rotundus* con los casos de RPB

Se cuenta con 409 registros confirmados y georreferenciados adecuadamente de la presencia de *D. rotundus*, distribuidos en 32 municipios, para el periodo de 1987 a 2019 (GBIF: 7; CFPPT: 183; y SENASICA: 219) (Figura 4) y 579 casos de RPB en el periodo 1999 a 2020, distribuidos en 28 municipios (CFPPT y SENASICA).



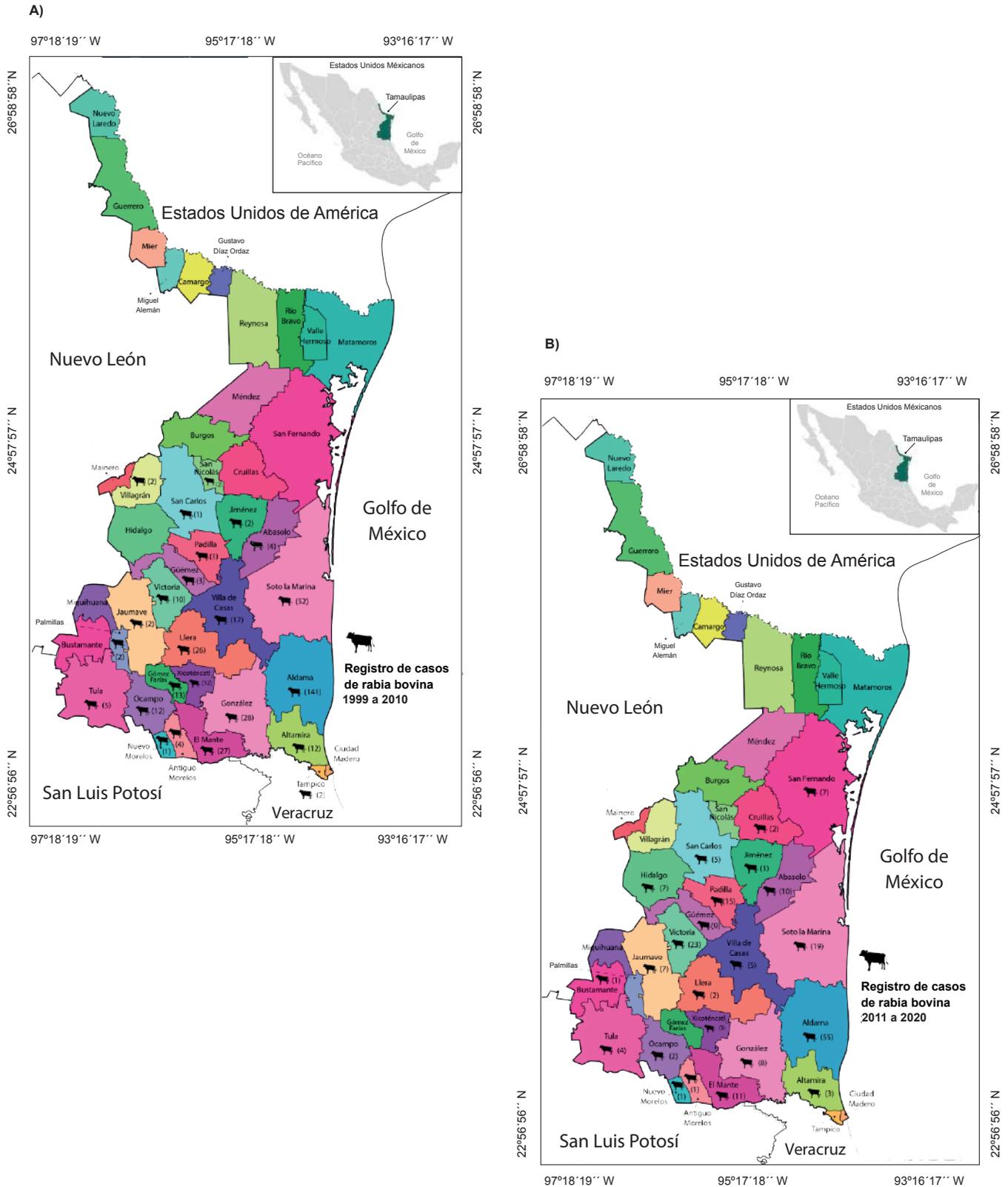
■ Figura 1. Casos de rabia paralítica bovina notificados en el estado de Tamaulipas por municipios tipificados con variante antigénica para el periodo 1999 a 2020 (CFPPT, SENASICA e InDRE).

Figure 1. Cases of bovine paralytic rabies reported by municipalities in the state of Tamaulipas classified with antigenic variation during the 1999 to 2020 period (CFPPT, SENASICA and INDR).



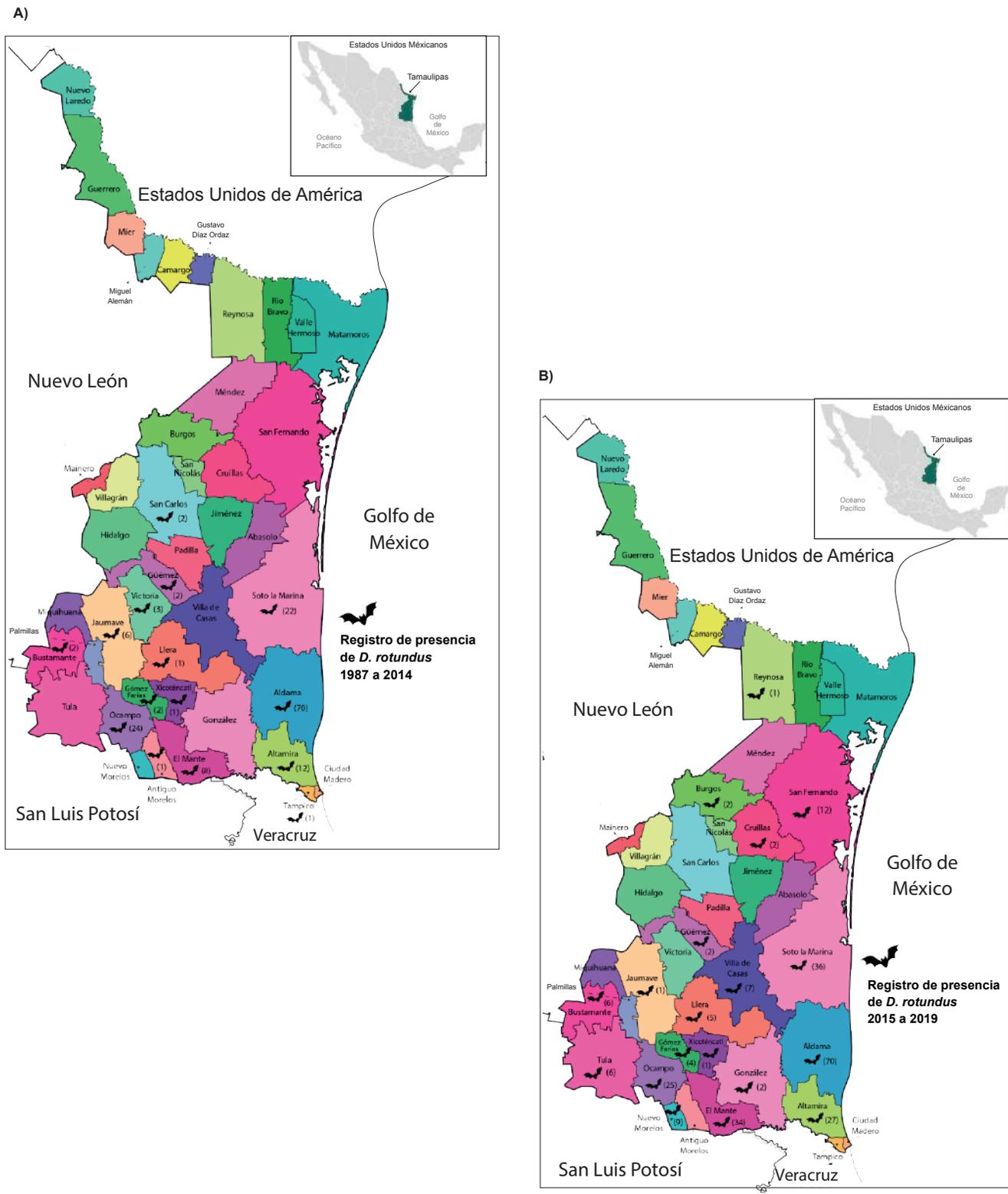
■ Figura 2. Casos de rabia paralítica bovina en los periodos de 1999 a 2010 y 2011 a 2020 y por municipio.

Figure 2. Cases of bovine paralytic rabies by municipality during the 1999 to 2010 and 2011 to 2020 periods.



■ Figura 3. Distribución de los casos de rabia paralítica bovina en Tamaulipas en los periodos: A) 1999 a 2010 y B) 2011 a 2020, donde se muestra que en el segundo periodo se notifican casos en San Fernando, Cruillas, Hidalgo y Bustamante.

Figure 3. Distribution of cases of bovine paralytic rabies in Tamaulipas during periods: A) 1999 a 2010 and B) 2011 a 2020, where it is shown that in the second period, cases were reported in San Fernando, Cruillas, Hidalgo, and Bustamante.



■ Figura 4. Distribución de los registros georreferenciados que confirman la presencia de *D. rotundus* en Tamaulipas en los periodos: A) 1987 a 2014 y B) 2015 a 2019, donde se muestra que en el segundo periodo se notifican registros en los municipios de Burgos, San Fernando, Cruillas y Reynosa.

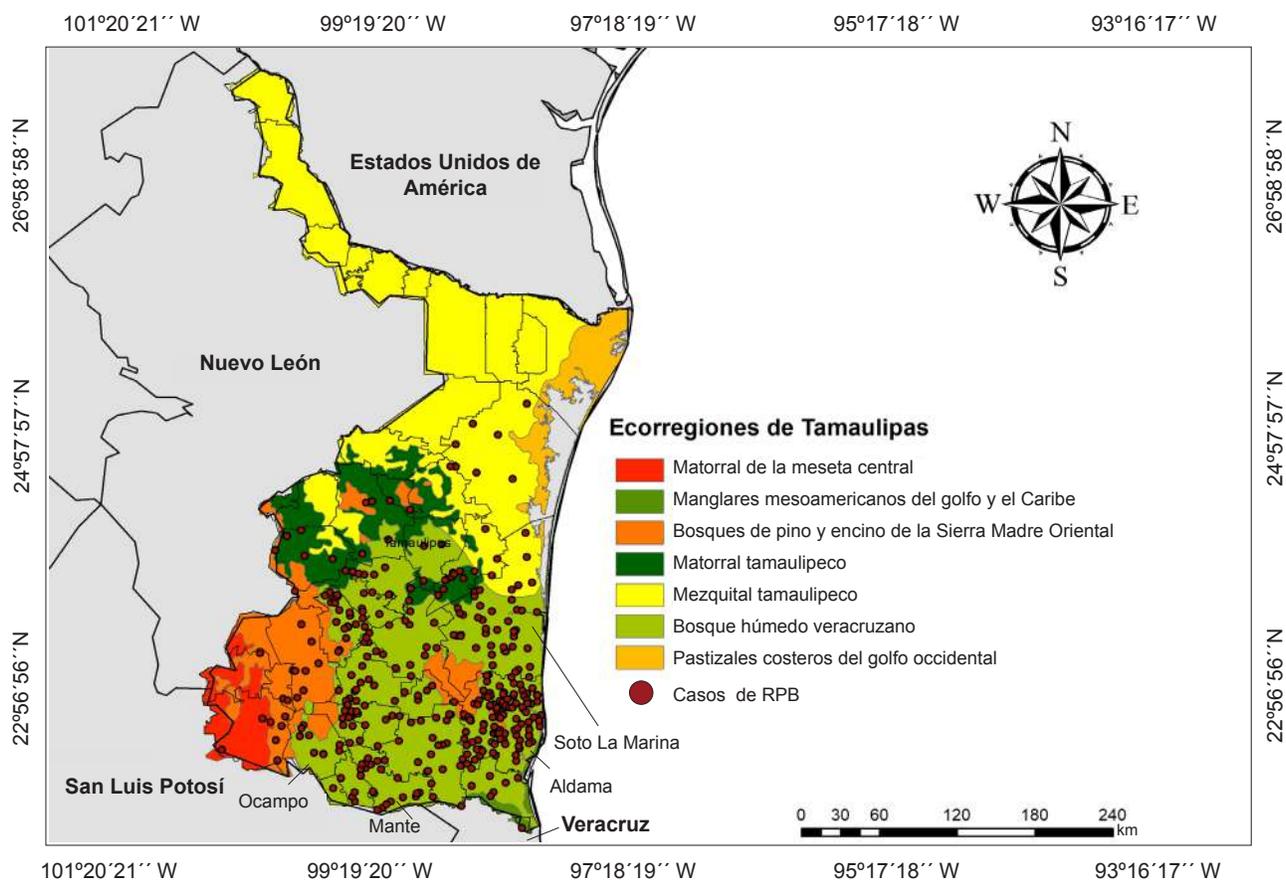
Figure 4. Distribution georeferenced records confirming presence of *D. rotundus* in Tamaulipas in the periods: A) 1987 to 2014 and B) 2015 to 2019, where it is shown that in the second period records are reported in the municipalities of Burgos, San Fernando, Cruillas and Reynosa.

En el mismo periodo, los operativos realizados por el CFPPT, como parte de las acciones de la Campaña para el control de las poblaciones de *D. rotundus*, permitieron registrar la presencia de *D. rotundus* en los municipios de Ciudad Madero, Méndez y Valle Hermoso, pero no fueron georreferenciados por lo que no se incluyeron en este trabajo. Es importante destacar que no existen reportes de RPB en esas 3 localidades.

Durante el periodo estudiado (1987 a 2019), el 73.23 % (424) del total de los casos de RPB, se registró en los municipios de Aldama (196), Soto La Marina (71), Mante (38), González (36), Victoria (33), Llera (28) y Villa de Casas (22) (Figuras 1 y 3). Localidades asociadas con una alta presencia del murciélago vampiro (Figura 4).

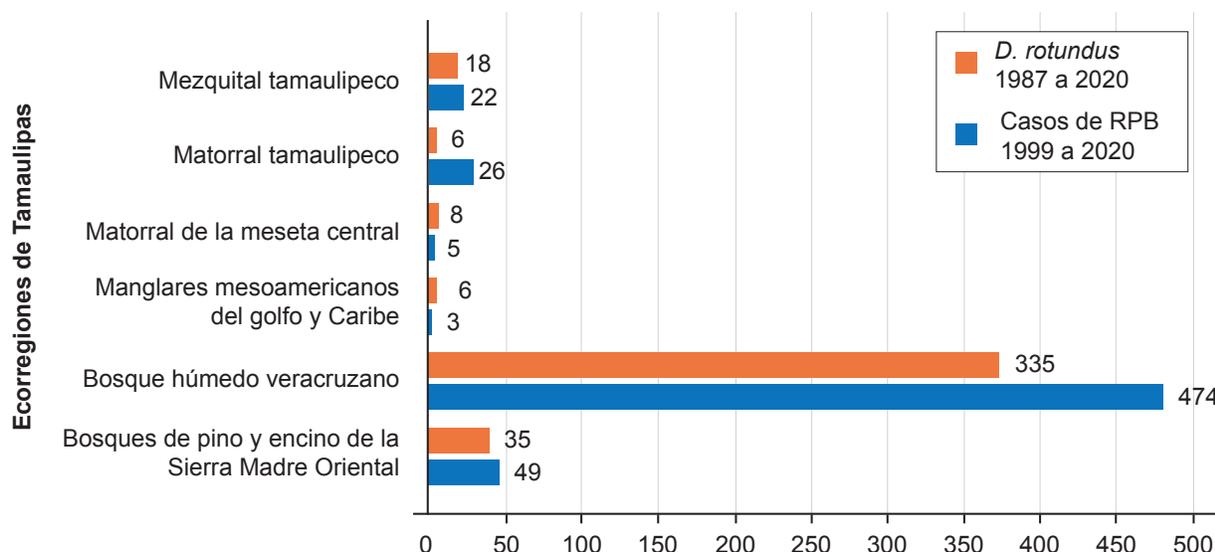
### Incidencia de RPB y *D. rotundus* en función de ecorregiones

En la ecorregión del bosque húmedo veracruzano, ubicada hacia el sur del estado, se concentran los municipios con el mayor número de casos de RPB y presencia de *D. rotundus* (Aldama, Soto La Marina y Mante) (Figuras 5 y 6). Esta ecorregión se caracteriza por contar con selva baja caducifolia, bosque de encino, zonas agrícolas y pastizales cultivados. En ella se localizan también tres de los 4 municipios que forman parte de la reserva de la Biosfera “El Cielo”, Ocampo, Llera y Gómez Farías. En este último, en el ejido San José, se ha reportado por foto trampeo a *D. rotundus* alimentándose principalmente de bovinos y otros animales domésticos, como equinos, que han sido introducidos por los



■ Figura 5. Distribución de los casos de rabia paralítica bovina (RPB) registrados en el periodo 2009 a 2020, utilizando las ecorregiones para la conservación natural de los ecosistemas terrestres en Tamaulipas, México.

Figure 5. Distribution of bovine paralytic rabies (BPR) cases registered in the period 2009 a 2020, using the ecoregions for natural conservation of terrestrial ecosystems in Tamaulipas, Mexico.



■ Figura 6. Comparación entre casos de RPB y la presencia de *D. rotundus* por ecorregión en Tamaulipas.

Figure 6. Comparison between the cases of bovine paralytic rabies (BPR) and the presence of *D. rotundus* by ecoregion in the state of Tamaulipas.

humanos que habitan dentro de la reserva, arriesgando su salud; pero también se ha observado que se alimentan de algunas especies silvestres, por ejemplo el temazate o venado cabrito (*Mazama temama*) (Figura 7), lo que sucede frecuentemente cuando la cantidad de ganado es menor o inexistente en su área de forrajeo (Benavides y col., 2020; Scheffer y col., 2022; Brown y Escobar, 2023).

La segunda ecorregión con mayor incidencia de casos de RPB y presencia del vampiro común fue la de los bosques de pino y encino de la Sierra Madre Oriental (Figura 6), caracterizados por vegetación de sierras templadas con elevaciones aisladas.

La tercera ecorregión de mayor incidencia en la presencia del RVR fue el mezquital tamaulipeco, pero fue la cuarta en cuanto a casos de RPB, los cuales comenzaron a presentarse a partir del segundo periodo (2011 a 2020). En el caso del municipio de San Fernando, los casos de RPB iniciaron en 2011, pero los registros georreferenciados de *D. rotundus*, en esta ecorregión, de acuerdo con los datos ana-

lizados, comenzaron a partir de 2015. Al respecto, es importante considerar que, algunos de los casos podrían deberse a la movilidad del ganado, previamente infectado, por la comercialización de los animales.

La cuarta ecorregión que tuvo más casos de RPB fue el matorral tamaulipeco, que abarca



■ Figura 7. *Desmodus rotundus* acechando a un temazate o venado cabrito (*Mazama temama*).  
Figure 7. *Desmodus rotundus* stalking a temazate or red brocket deer (*Mazama temama*).

los municipios de Cruillas, Hidalgo, San Carlos, San Nicolás y Villagrán, por mencionar algunos; pero en ella se registró baja presencia del vampiro común.

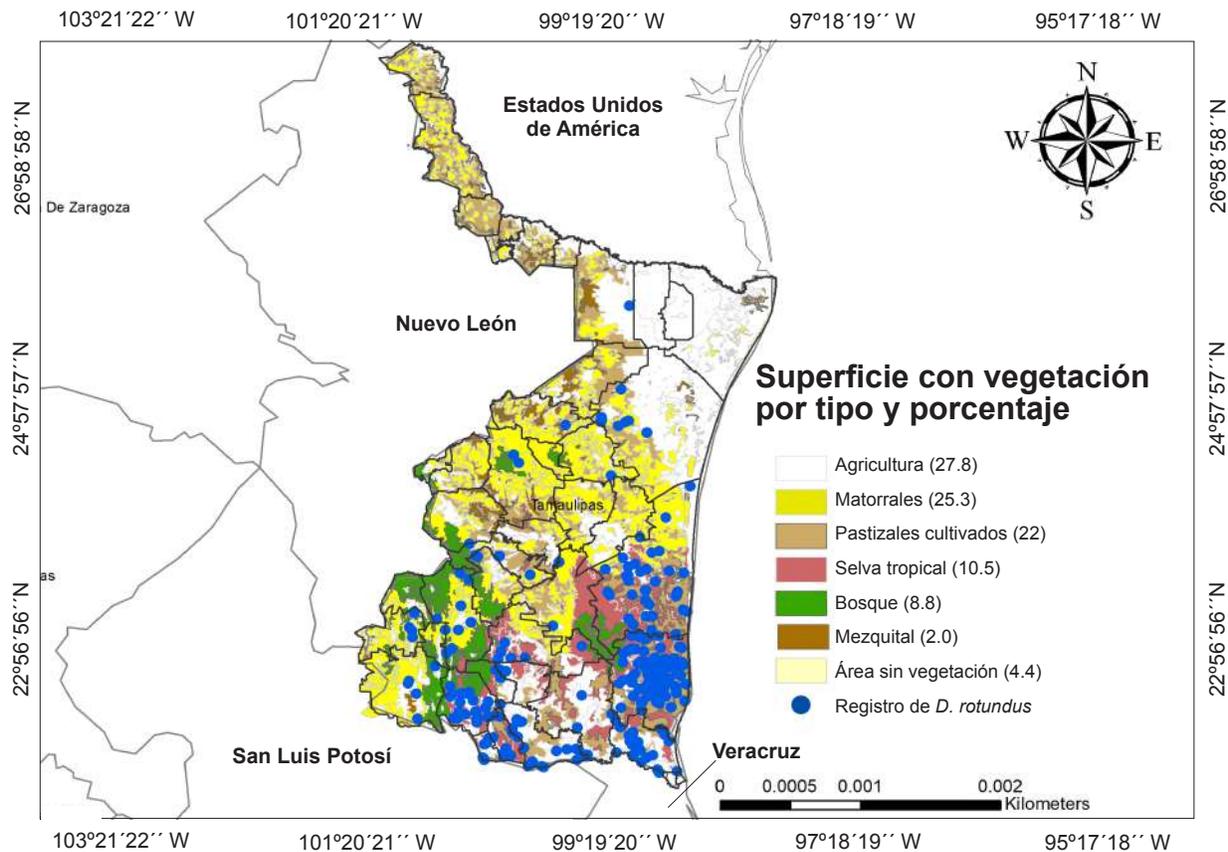
Algunas ecorregiones parecieran tener características que las hacen menos probables a la presencia del RVR o de la enfermedad (Figura 5). La ecorregión de pastizales costeros del golfo occidental fue la única que no presentó registros de RPB, ni tampoco avistamientos o capturas de *D. rotundus*. En tanto que, la ecorregión del mezquital tamaulipeco no presentó incidencia de RPB en su parte norte. En este ecosistema, la vegetación nativa corresponde a selva baja caducifolia y selva baja espinosa, bosques de encino mixtos, así como grandes planicies hacia el noreste y norte del estado con vegetación xerófila. Sin embargo, parte de esta vege-

tación ha sido gradualmente desplazada por efecto de actividades antropogénicas, como la agricultura y la ganadería, transformándose en suelos agrícolas y pastizales cultivados, que constituyen gran parte del territorio (INEGI, 2023), actividades que suelen asociarse a la presencia del reservorio, pero que en estas latitudes aún no ha sido el caso.

#### Asociación del tipo de vegetación y ecorregión con la presencia de RPB y *D. rotundus*

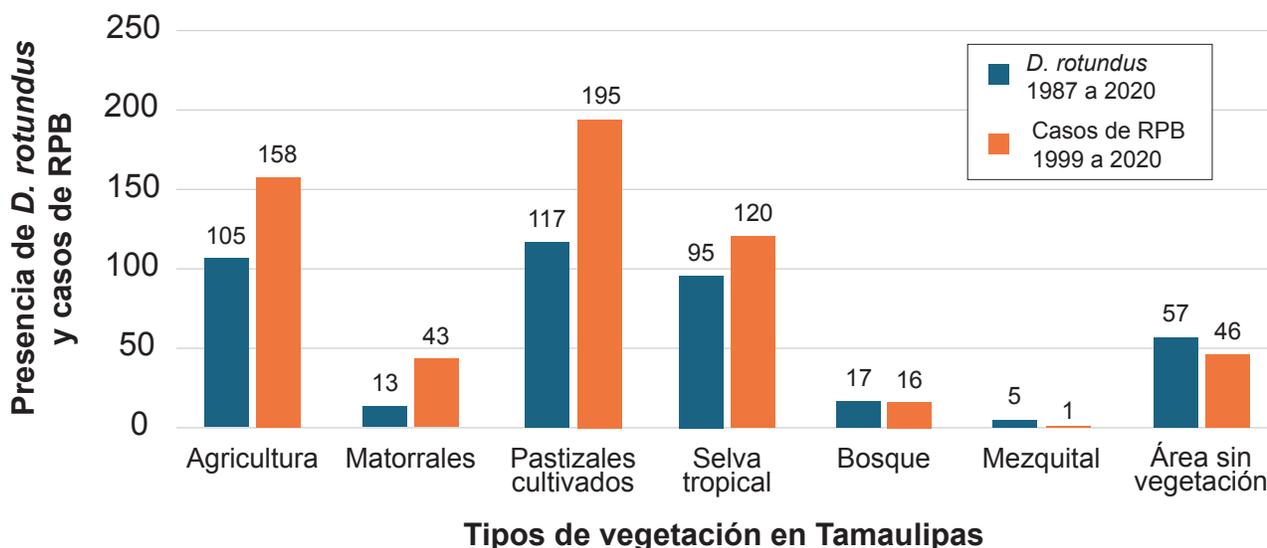
Los 32 municipios en los que se registró la presencia de *D. rotundus* se caracterizaron por contar con vegetación tipo pastizales cultivados (117), áreas agrícolas (105) y selva tropical (95) (Figuras 8 y 9). El mayor número de registros de esta especie se observó en el sur del estado.

En cuanto al tipo de vegetación fueron las áreas de pastizales cultivados (195), agricultu-



■ Figura 8. Tipo de vegetación y registros de *Desmodus rotundus* de 1987 al 2019, en el estado de Tamaulipas.

Figure 8. Vegetation type and records of *Desmodus rotundus* cases from 1987 to 2019, in Tamaulipas.



■ Figura 9. Comparación entre casos de RPB y la presencia de *Desmodus rotundus* por tipo de vegetación en Tamaulipas a lo largo del tiempo.

Figure 9. Comparison between cases of bovine paralytic rabies (BPR) and the presence of *Desmodus rotundus* based on vegetation type over time in Tamaulipas.

ra (158) y selva tropical (120) en las que ocurrieron la mayoría de los casos de RPB (Figura 9).

El índice de marginalidad media y análisis de correspondencia simple (Tabla 1) indicó que la presencia de casos de RPB estuvo significativamente asociada (Prueba de  $X^2$ ;  $P < 0.01$ ) con las ecorregiones terrestres, categorizadas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (INEGI, 2016) como selvas cálido-secas. Estas se caracterizan por contar con selva baja caducifolia (bosque húmedo veracruzano), lo-

calizadas en el sur del estado, sierras templadas con elevaciones aisladas (bosques de pino y encino de la Sierra Madre Oriental); mientras que en los plegamientos del Altiplano Zacatecano-Potosino con vegetación xerófila (matorral de la meseta central) y bosques de encino mixtos, así como grandes planicies hacia el noreste y norte del estado con vegetación xerófila (mezquital tamaulipeco), se reportó una reducida o nula presencia de casos. El eje X (número de casos de RPB y presencia del RVR) explica el 58.39 % de los cambios y el eje Y valor de tipo de vegetación por ecorregión) explica el 41.61 %.

■ Tabla 1. Análisis de correspondencia simple (AC) de incidencia de casos de RPB y presencia de *Desmodus rotundus* por ecorregión ( $X^2 = 98.33$ , Grados de libertad = 20,  $P < 0.01$ ).

Table 1. Simple correspondence analysis (CA) of the incidence of RPB cases and *Desmodus rotundus* presence by ecoregion ( $X^2 = 98.33$ , Degrees of freedom = 20,  $P < 0.01$ ).

Estadístico	Eje X	Eje Y
Valor singular	0.27	0.23
Autovalor	0.07	0.05
% de varianza explicada (Inercia)	58.39	41.61
Varianza acumulada (Inercia)	58.39	100
$X^2$	57.42	40.91

El índice de marginalidad media y análisis de correspondencia simple (Tabla 2) indicó que la presencia de casos de rabia estuvo significativamente asociada (Prueba de  $X^2$ ;  $P < 0.01$ ) con el tipo de vegetación categorizada por la CONABIO (INEGI, 2016) y la presencia del reservorio. El eje X (Dimensión 1: número de casos de RPB y presencia del RVR) explica el 68.83 % de los cambios y el eje Y (Dimensión 2: tipo de vegetación) explica el 31.17 %. En los desiertos micrófilos existe escasa o nula presencia del reservorio y en consecuencia ausencia de casos de RPB. Las selvas, matorrales y bosques están asociados con los casos positivos de RPB, pero no tan fuerte como los ambientes que están más cerca de *D. rotundus* como las zonas agrícolas y los pastizales cultivados.

El análisis gráfico de correspondencia simple (Figura 10) indica que los desiertos micrófilos (matorral desértico rosetófilo y micrófilo), selva media subcaducifolia y mezquital xerófilo se asocian con la ausencia de casos de RPB y se diferencian claramente del resto de las categorías. Esto sugiere que, en los desiertos hay una menor presencia del *D. rotundus*, por lo tanto, menos casos positivos.

Los casos positivos de RPB estuvieron muy cerca de la presencia del RVR, indicando una fuerte relación entre la presencia del reservorio y la ocurrencia de la enfermedad. Esto es coherente con el conocimiento de que *D. rotundus* es el principal RVR (Brown y Escobar, 2023).

Los bosques tropicales, selvas mediana subcaducifolia, matorrales secundarios, matorral espinoso tamaulipeco y el mezquital tropical están asociados con la presencia de *D. rotundus* y con los casos positivos a rabia. Esto podría deberse a que estos ambientes proporcionan un hábitat favorable para el RVR (Benavides y col., 2020).

Los ambientes antropizados se sitúan entre la presencia del RVR y los casos positivos de RPB como las zonas agrícolas de temporal y riego, pastizales cultivados y palmar inducido, sugiriendo que la actividad humana puede estar mediando la relación entre el RVR y RPB, debido a la ganadería y la posible movilización del ganado.

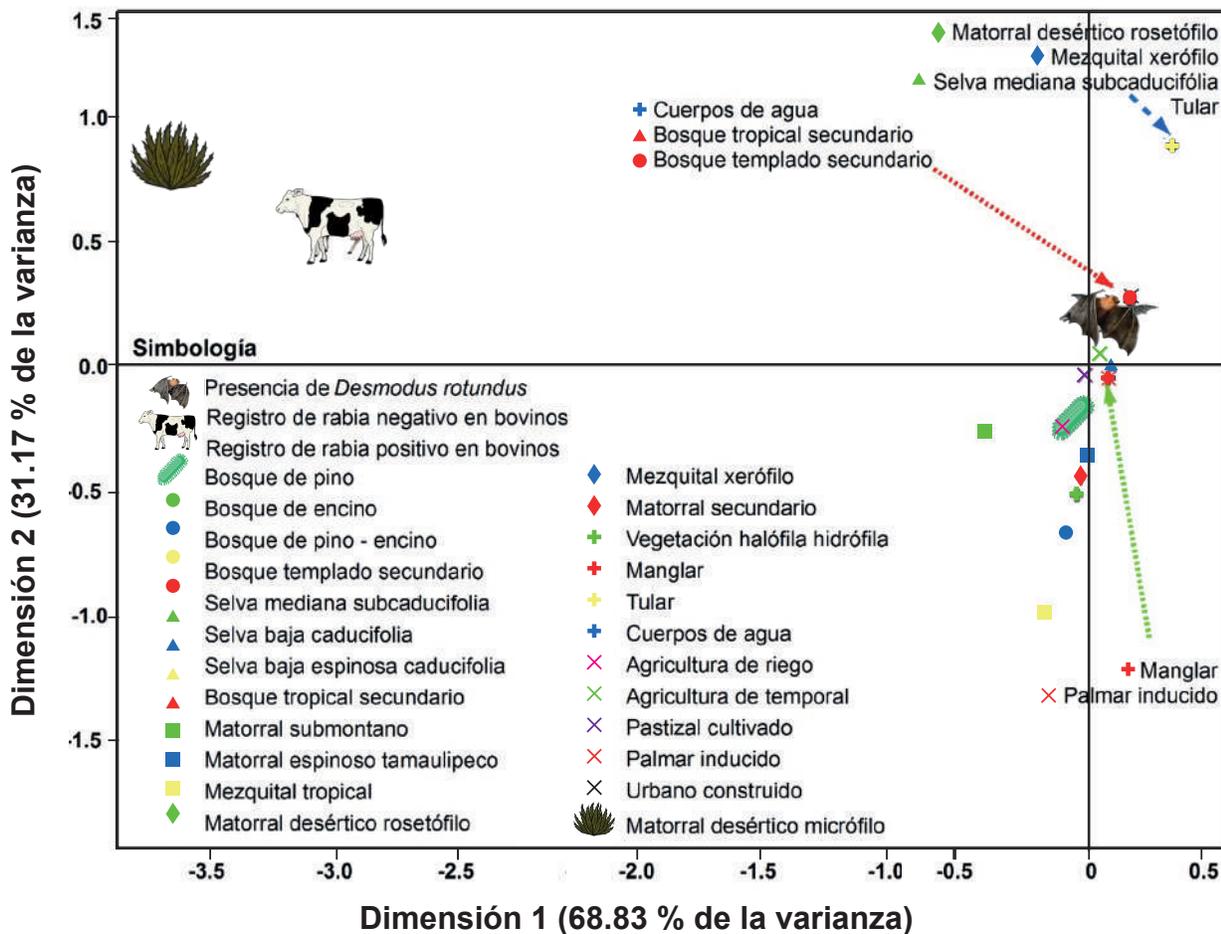
## DISCUSIÓN

En el periodo 1999 a 2020 se presentaron 579 casos de RPB en Tamaulipas, distribuidos en 28 de los 43 municipios del estado. Burgos, ubicado al norte, en la ecorregión del mezquital tamaulipeco, fue el único de los 28 municipios considerados productores de ganado en el estado (SIAP-SIACON, 2023) que no registró casos de RPB (Figuras 2 y 3), aunque sí la existencia del vampiro común (Figura 4). En contraste, Tampico, en la parte sur, sin actividad económica relevante en la producción de ganado (SIAP-SIACON, 2023), presentó 2 casos de RPB (Figuras 2 y 3) y la presencia del vampiro común (Figura 4). Los casos de rabia en ovinos y caprinos se reportaron en menor proporción que los casos en bovinos, lo que puede deberse a las preferencias de alimentación del murciélago vampiro por el ganado de mayor tamaño como son

■ Tabla 2. Análisis de correspondencia simple (AC) de incidencia de casos de RPB y *D. rotundus* por tipo de vegetación ( $X^2 = 124.06$ , Grados de libertad = 46,  $P < 0.01$ ).

Table 2. Simple Correspondence Analysis (CA) of the incidence of RPB and *D. rotundus* by vegetation type ( $X^2 = 124.06$ , Degrees of freedom = 46,  $P < 0.01$ ).

Estadístico	Eje X	Eje Y
Valor singular	0.32	0.21
Autovalor	0.10	0.04
% de varianza explicada (Inercia)	68.83	31.17
Varianza acumulada (Inercia)	68.83	100
$X^2$	85.38	38.67



■ Figura 10. Diagrama del análisis de dispersión con los análisis de correspondencia de incidencia de RPB y *D. rotundus* por tipo de vegetación: Dimensión 1 (68.83 % de la varianza) y Dimensión 2 (31.17 % de la varianza).

Figure 10. Scatter plot of correspondence analysis of the incidence of RPB and *D. rotundus* by vegetation type: Dimension 1 (68.83 % of the variance) and Dimension 2 (31.17 % of the variance).

los bovinos (Mialhe, 2014; Benavides y col., 2020; Scheffer y col., 2022).

Desde el primer reporte de casos de rabia en especies ganaderas, en 1994, en la zona sur de Tamaulipas, se implementaron medidas epizootiológicas con el objetivo de evitar los casos de RPB, como la vacunación y el control de las poblaciones del RVR en las áreas donde se hubiese documentado la presencia del vampiro *D. rotundus*, por la CFPPT (NOM-067-ZOO-2007). Los resultados de este estudio muestran que a pesar de las acciones realizadas, no se ha generado alguna evidencia de que éstas reduzcan los casos de rabia en el ganado (Figuras 2 y 3). Aspecto que sugiere la necesidad de un abor-

daje más profundo respecto a las estrategias y medidas de prevención y control de la RPB, ya que históricamente los esfuerzos prolongados para controlar las poblaciones de *D. rotundus* no han demostrado ser efectivos para erradicar la RPB.

La eliminación selectiva de individuos adultos podría facilitar la propagación de la rabia al aumentar la dispersión de murciélagos para ocupar nichos vacíos (Blackwood y col., 2013), propiciando la dispersión, no solo de las poblaciones de *D. rotundus*, sino también del virus rábico. En un estudio realizado en Perú, en el que se compararon las seroprevalencias entre colonias de *D. rotundus* con diferentes estrategias de control, los autores

demonstraron que los programas de capturas y eliminación no tuvieron un efecto positivo sobre la disminución de los casos de rabia, debido a que las seroprevalencias del virus rábico se mantuvieron entre 3 % y 28 % en las poblaciones, siendo mayores en murciélagos juveniles y subadultos (Streicker y col., 2012).

En el presente estudio, el número de casos disminuyó en el segundo periodo analizado en Tamaulipas (2011 a 2020), pero es evidente que se registraron casos positivos en municipios como Cruillas y San Fernando, donde se reportó también la presencia de *D. rotundus* en el segundo periodo estudiado (2015 a 2019). Esto indica la importancia de realizar más estudios para poder explicar la variabilidad de los casos de rabia en el estado de Tamaulipas, considerando otras variables como la seroprevalencia del virus en el RVR y el esfuerzo de las medidas epizooticas para la prevención y control de la rabia.

La vacunación del ganado en las zonas de riesgo representa una estrategia a considerar para disminuir la prevalencia de rabia en las especies ganaderas. Esta medida reduciría el costo que ocasiona la enfermedad por la alta tasa de mortalidad (100 %) de los animales enfermos (Rocha y Dias, 2020). No obstante, su implementación requiere de la concientización y el esfuerzo coordinado de las organizaciones y agencias gubernamentales encargadas en el estado de la prevención y control de la rabia, así como de los ganaderos para seguir incrementando la cobertura de vacunación en las áreas endémicas a RPB (Johnson y col., 2018; Rojas-Sereno y col., 2022).

La investigación socioeconómica que aborde el costo/beneficio y las barreras que están asociadas a la vacunación, deben ser una prioridad para la salud humana y animal. Abordar el problema de la rabia en las especies ganaderas y en la fauna silvestre desde el concepto de “Una Salud” significaría un cambio para proponer nuevas alternativas en

las estrategias de vacunación de reactivas a preventivas (Maldonado-Arias y col., 2024). El abordaje de la rabia desde “Una Salud” requiere retomar las consideraciones que Louis Pasteur desde 1885 hacía sobre esta enfermedad, señalando que la única manera de evitar que los humanos se contagiaran era controlando la enfermedad en el reservorio a través de la vacunación. En ese tiempo, únicamente los cánidos eran reconocidos como la principal fuente de transmisión a los humanos (SSA, 2023). En la actualidad, México ha logrado de manera exitosa controlar la rabia humana transmitida por perros (que tienen al vampiro común como uno de sus principales vectores de contagio), mediante la vacunación de estas mascotas (Calderón y col., 2014).

En el caso de los vampiros comunes, considerados los principales transmisores de la rabia al ganado, y desde el enfoque de “Una Salud”, las intervenciones que se hagan deben encaminarse al control de la rabia en esta especie reservorio, más que a la eliminación de sus poblaciones, generando estrategias que permitan su vacunación (Natesan y col., 2023). Diversos estudios han abordado este enfoque (Aguilar-Setién y col., 1998; 2002; Almeida y col., 2005; 2008; Cárdenas-Canales y col., 2022) con resultados prometedores, de manera que se protege a las especies silvestres y también se evita que éstas infecten a los humanos y a los animales domésticos. Un pequeño cambio en las estrategias de control podría representar una transformación en el panorama epidemiológico en los países que cuentan con distribución natural del murciélago *D. rotundus*.

Los casos positivos de RPB y la presencia de *D. rotundus* parecieron asociarse con ecorregiones que ofrecen condiciones favorables para la presencia del RVR y la enfermedad, y que son aquellas con vegetación más rica y diversa, como es el bosque húmedo veracruzano, selva mediana caducifolia y lomeríos y sierras con matorral xerófilo y bosques de encino, como es el caso de la Sierra de Maratines (en Aldama). También están presentes lo-

meríos y planicies con selva baja caducifolia (Sierra de Cucharas en los límites de Gómez Farías, Ciudad Mante y Ocampo) y elevaciones aisladas y plegamientos del Altiplano Zacatecano-Potosino (Mante, Antiguo Morelos y Ocampo) con vegetación xerófila, bosques de coníferas, de encino y mixtos (CONABIO, 2021).

Los casos positivos a rabia y la presencia del RVR tendieron a ocurrir en regiones con ambientes antropizados, que han sufrido cambios considerables en el uso de suelo y la vegetación por la agricultura y la ganadería, como en los municipios de Aldama, Altamira y Soto la Marina (INEGI, 2023) (Figuras 5 y 8). Estos entornos parecen jugar un papel importante en la dinámica del mantenimiento de la enfermedad, lo que sugiere que los esfuerzos de control deben centrarse en ellas y en las áreas cercanas para prevenir su propagación.

Los casos negativos de RPB estuvieron asociados con Planicies del Altiplano Zacatecano-Potosino, lo que sugiere que estas áreas tienen características que las hacen menos propensas para que ocurran casos de RPB (por ejemplo, la presencia de matorrales desérticos micrófilos), lo que podría deberse al tipo de vegetación y la escasa actividad ganadera (Figura 8). En estas áreas hay una menor necesidad de enfocar esfuerzos de control del RVR, pero se debe mantener un programa de vigilancia epidemiológica pasiva para la enfermedad.

La probabilidad de que *D. rotundus* ocupe nuevos nichos en Tamaulipas dependerá de diversos factores asociados entre sí, como pueden ser, ecogeográficos, ecológicos, comportamiento de la especie, genéticos, los asociados a las actividades humanas como es la agricultura y la ganadería, y los efectos de cambio climático (Ortega-Sánchez y col., 2022; Van-de-Vuurst y col., 2023). Esto puede observarse en la forma en cómo la distribución de *D. rotundus* se ha incrementado hacia el norte y noreste del estado, en la ecorregión denominada mezquital tamaulipeco, asociado

a los registros de casos positivos a RPB (Figuras 3 y 5), lo que coincide con la investigación de Viana y col. (2023). En el municipio de San Fernando, en el año 2015, los operativos realizados por el CFPPPT permitieron detectar la presencia de *D. rotundus*, asociados a casos de RPB. En Reynosa se localizó su presencia en 2016, aunque aún no hay reportes oficiales de RPB en el municipio.

Existe un temor de que el cambio climático y el cambio de uso de suelo en esta ecorregión, para desarrollar actividades de agricultura y ganadería, favorezcan que el murciélago vampiro pueda extender su distribución hacia EUA, particularmente al estado de fronterizo de Texas, ya que las ecorregiones del noreste de México denominadas pastizales costeros del golfo occidental (en donde no existen aún reportes de RPB ni de *D. rotundus*) y mezquital tamaulipeco (en la que ya hay reportes de ambos), se extienden hacia el sur de Texas, por lo que ofrecen un hábitat contiguo con una geología y una estructura de vegetación similares (Piaggio y col., 2017), lo que introduciría en ese país un nuevo vector de casos de rabia (Van-de-Vuurst y col., 2023), de acuerdo con el modelo de distribución para esta especie de Hayes y Piaggio (2018).

Van-de-Vuurst y col. (2023) consideran que *D. rotundus* se ha expandido hacia el norte de México a un ritmo promedio de 9.76 km por año y su desplazamiento podría obedecer a una modificación en la estacionalidad histórica de la temperatura (es decir, la desviación estándar), variable estrechamente relacionada con los cambios en el clima y el calentamiento global. En el presente estudio, fue posible establecer que, en Tamaulipas, *D. rotundus* muestra estar cambiando su distribución hacia el norte, infectando de rabia al ganado bovino en regiones donde no había presencia de la enfermedad (Figuras 3 y 5). Por lo tanto, es importante mantener acciones de vigilancia epidemiológica para detectar si circula el virus en las poblaciones ubicadas en los municipios del norte y noreste del estado, donde actualmente se ha registra-

do la presencia de *D. rotundus*, pero no se han registrado casos de rabia.

La posibilidad de una migración hacia al norte ha sido sugerida por la evidencia en el registro fósil (alrededor de 5 000 a 35 000 años antes del presente), que sugiere que especies extintas del género *Desmodus* ocupaban algunas áreas de lo que ahora es EUA, desde el norte de California (Pleistoceno tardío, y son conocidos del área de Big Bend en el oeste de Texas), de la actual región del archipiélago de Mandrean de Nuevo México (estimada entre 29 000 y 36 000 años antes del presente); de Cuba (< 10 000 años antes del presente) y de varios sitios en Florida (Greenhall y col., 1983; Ray y col., 1998). Sin embargo, no se tiene información si las condiciones climáticas eran similares o si esas especies contaban con una fisiología semejante para adaptarse a los mismos climas.

En los últimos 5 años, posteriores al periodo abarcado en este estudio, se han registrado 28 nuevos casos de rabia en bovinos, 5 en equinos y 2 en murciélago hematófago en los municipios de Güemes y Abasolo (SIRVERA, 2024), indicando que la rabia en especies ganaderas es un problema que persiste en Tamaulipas. Esto vuelve necesario mantener estudios de la tendencia de distribución tanto de *D. rotundus* como de la RPB, con interés particular en las densidades poblacionales de la especie en las localidades donde se realizan las capturas y su asociación con los censos de la población de bovinos. Lo último no fue posible realizarlo en el presente estudio, debido a que no se cuenta con una capa en la escala espacial que permitiera desarrollarlo.

## CONCLUSIONES

La RPB se encontró presente en 28 de los 43 municipios de Tamaulipas, mientras que el principal transmisor de rabia en el estado, *D. rotundus*, se distribuyó en 32. La tendencia de *D. rotundus* de avanzar hacia el norte del estado, reflejada en el segundo periodo de estudio, y los brotes de casos de RPB en esa latitud, abren la posibilidad de que la es-

pecie extienda su distribución hacia Texas, Estados Unidos de América, país actualmente considerado libre de la presencia de la especie, debido a que sus características geográficas y ecológicas son similares a las de Tamaulipas. Entre las variables analizadas, las características de las ecorregiones, el cambio de uso de suelo y la vegetación, influyeron en la distribución de *D. rotundus*. A su vez, esas mismas variables, más la presencia de *D. rotundus* permitieron explicar, al menos parcialmente, la variabilidad de la distribución de los casos de casos de RPB. El cambio en la distribución del vector y de los casos de RPB indican la necesidad de seguir estudiando este fenómeno, pero se debe considerar también como variable la densidad ganadera, ya que las regiones centro y sur se caracterizan por contar con mayor actividad ganadera en Tamaulipas, mayor incidencia de *D. rotundus* y alta prevalencia de rabia en ganado; por lo que, los análisis posteriores que incluyan estas variables contribuirán a mejorar los modelos predictivos de distribución de la especie reservorio y los brotes de RPB.

## AGRADECIMIENTOS

Programa de mejoramiento del Profesorado (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública del Gobierno Federal, por la Beca otorgada para la realización del doctorado en Ecología y Manejo de Recursos Naturales del M. en C. José Ignacio Olave Leyva. A la M. en C. Araceli Casar Solares, del Laboratorio Estatal de Salud Pública (LESP) de Tamaulipas; y a la directora del Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológica (InDRE), la Biól. Irma López Martínez, así como al personal adscrito al Laboratorio de Rabia. Al M. V. Z. Alejandro Jiménez Ramírez, excoordinador de rabia bovina en México, por los datos aportados para el presente estudio; al Dr. Víctor Abraham Vargas Vázquez, por sus aportaciones en la revisión del artículo. Al Comité Para el Fomento y Protección Pecuaría de Tamaulipas, A. C. (CFPPT) y al M. V. Z. Pedro Zúñiga Pansine, por su colaboración y acceso a la información.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de in-

tereses de ningún tipo.

## REFERENCIAS

- Acha, P., Acevedo-Whitehouse, K., de-la-Cueva, H., Gulland, F. M. D., Auriolles-Gamboa, D., Arellano-Carbajal, F. y Suarez-Güemes, F. (1968). Epidemiología de la rabia bovina paralítica transmitida por los quirópteros. *Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana*, 64, 411-430.
- Aguilar-Setién, A., Brochier, B., Tordo, N., De-Paz, O., Desmettre, P., Péharpré, D. y Pastoret, P. P. (1998). Experimental rabies infection and oral vaccination in vampire bats (*Desmodus rotundus*). *Vaccine*, 16(11-12), 1122-1126. [https://doi.org/10.1016/s0264-410x\(98\)80108-4](https://doi.org/10.1016/s0264-410x(98)80108-4)
- Aguilar-Setién A, Campos, Y. L., Cruz, E. T., Kretschmer, R., Brochier, B., & Pastoret, P. P. (2002). Vaccination of vampire bats using recombinant vaccinia-rabies virus. *Journal of Wildlife Diseases*, 38(3), 539-44.
- Almeida, M. F., Martorelli, L. F. A., Aires, C. C., Sallum, P. C., & Massad, E. (2005). Indirect oral immunization of captive vampires, *Desmodus rotundus*. *Virus Res*, 111(1), 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2005.03.013>
- Almeida, M. F., Martorelli, L. F. A., Aires, C. C., Barros, R. F., & Massad, E. (2008). Vaccinating the vampire bat *Desmodus rotundus* against rabies. *Virus Research*, 137(2), 275-277. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2008.07.024>
- Aréchiga-Ceballos, N., Puebla-Rodríguez P., & Aguilar-Setién, Á. (2022). The New Face of Human Rabies in Mexico, What's Next After Eradicating Rabies in Dogs. *Vector-Borne and Zoonotic Diseases*, 22, 69-75. <https://doi.org/10.1089/vbz.2021.0051>
- Arriaga-Flores, J. C. (2010). Estudio preliminar sobre la quiroptero fauna del cañón de "La Peregrina", municipio de Victoria, Tamaulipas, México. *TecnoIntelecto*, 1-8.
- Batalla-Campero, D. y Flores-Crespo, R. (1998). La rabia en las diferentes especies, sus transmisores y su control. Rabia Paralítica Bovina (pp. 41-49) INIFAP-SAGAR. Secretaría de Educación Pública. ISBN 970-92109-0-4.
- Benavides, J. A., Valderrama, W., Recuenco, S., Uieda, W., Suzán, G., Ávila-Flores, R., Velasco-Villa, A., Almeida, M., Andrade-Fag, D., Molina-Flores, B., Vigilato, M., Pompei, J. C. A., Tizzani, P., Carreira, J. E., Ibanez, D., & Streicker, D. G. (2020). Defining New Pathways to Manage the Ongoing Emergence of Bat Rabies in Latin America. *Viruses*, 12, 1002. <https://doi.org/10.3390/v12091002>
- Blackwood, J. C., Streicker, D. G., Altizer, S., & Rohani, P. (2013). Resolving the roles of immunity, pathogenesis, and immigration for rabies persistence in vampire bats. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 20837-20842. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308817110>
- Bodenchuk, M. J. & Bergman, D. L. (2020). Vampire Bats: Preparing for range expansion into the U.S. *Proceedings of the Vertebrate Pest Conference*, 29, 1-9
- Botto-Nuñez, G., Becker, D. J., Lawrence, R. L., & Plowright, R. K. (2020). Synergistic Effects of Grassland Fragmentation and Temperature on Bovine Rabies Emergence. *Eco Health*, 17(2), 203-216. <https://doi.org/10.1007/s10393-020-01486-9>
- Brown, N. & Escobar, L. E. (2023). A review of the diet of the common vampire bat (*Desmodus rotundus*) in the context of anthropogenic change. *Mammalian Biology*, 103(4), 433-453. <https://doi.org/10.1007/s42991-023-00358-3>
- Burgin, C. J., Colella, J. P., Kahn, P. L., & Upham, N. S. (2018). How many species of mammals are there? *Journal of Mammalogy* 99, 1-14. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyx147>
- Calderón-Rangel, A., Rodríguez-Rodríguez, V. C., & Guzmán-Teran, C. A. (2014). Análisis filogenético del virus de la rabia en mamíferos reportados en Colombia entre 1994 y 2008. *Ciencia y Agricultura*, 11(2), 69-75.
- Cárdenas-Canales, E. M., Velasco-Villa, A., Ellison, J. A., Satheshkumar, P. S., Osorio J. E., & Rocke, T. E. (2022). A recombinant rabies vaccine that prevents viral shedding in rabid common vampire bats (*Desmodus rotundus*). *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 16(8), e0010699.
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281.
- Dolédéc, S., Chessel, D., & Gimaret-Carpentier, C. (2000). Niche separation in community analysis: A new method. *Ecology*, 81, 2914-2927.
- FloreFlores-Crespo, R. (1998). Biología y control de murciélagos vampiros. En R. Flores-Crespo (Ed.),

*La rabia en las diferentes especies, sus transmisores y su control* (1a ed., 80-99 pp.). INIFAP-SAGAR.

Gobierno del Estado de Tamaulipas (2023). Secretaría de Desarrollo Rural Pesca y Acuicultura, en *Temas del sector Ganadería*. [En línea]. Disponible en: <https://www.tamaulipas.gob.mx/desarrollo-rural/temas-del-sector/ganaderia/>. Fecha de consulta: 11 de septiembre de 2023.

GBIF.org (2021). Base de datos de observaciones de *Desmodus rotundus* en su área natural de Distribución. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15468/dl.sb3eg6>. Fecha de consulta: 28 de octubre de 2021.

Greenhall, B. A. M., Joermann, G., & Schmidt, U. (1983). *Desmodus Rotundus*. *The American Society of Mammalogists*, (202), 1-6.

Hayes, M. A. & Piaggio, A. J. (2018). Assessing the potential impacts of a changing climate on the distribution of a rabies virus vector. *Plos One* 13, e0192887.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2016). Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, (2017) serie VI (continuo nacional). [En línea]. Disponible en: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/usv/inegi/usv250s6gw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s6gw). Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2021.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2023). Información por entidad: Tamaulipas. [En línea]. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tam/default.aspx?tema=me&e=28> Fecha de consulta: 11 de noviembre de 2023.

Johnson, N. & Montaña-Hirose, J. A. (2018). The impact of paralytic bovine rabies transmitted by vampire bats in Latin America and the Caribbean. *Revue Scientifique et Technique (International Office of Epizootics)*, 37(2), 451-459.

Jori, F., Hernandez-Jover, M., Magouras, I., Dürr, S., & Brookes, V. J. (2021) Wildlife–livestock interactions in animal production systems: what are the biosecurity and health implications? *Animal Frontiers*, 11, 8–19. <https://doi.org/10.1093/af/vfab045>

Maldonado-Arias, D. F., Guamán-Rivera, S. A., Mira-Naranjo, J. M., & Ortiz-Naveda, N. R. (2024). Bovine rabies cases in Ecuador: a retrospective cross-sectional observational study (2007 to 2020). *Brazilian Journal of Biology*, 84, 1–10. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.279112>

Martínez-Burnes, J., Lopez, A., Medellín, J., Haines, D., Loza, E., & Martínez, M. (1997). An outbreak of

vampire bat-transmitted rabies in cattle in northeastern Mexico. *Canadian Veterinary Journal*, 38, 175-177.

Meza, D. K., Mollentze, N., Broos, A., Tello, C., Valderrama, W., Recuenco, S., Carrera, J. E., Shiva, C., Falcon, N., Viana, M., & Streicker, D. G. (2022). Ecological determinants of rabies virus dynamics in vampire bats and spillover to livestock. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 289, 20220860. <https://doi.org/10.1098/rspb.2022.0860>

Mialhe, P. J. (2014). Preferential prey selection by *Desmodus rotundus* (E. Geoffroy, 1810, Chiroptera, Phyllostomidae) feeding on domestic herbivores in the municipality of São Pedro – SP. *Brazilian Journal of Biology*, 74(3), 579-584. <https://doi.org/10.1590/bjb.2014.0086>

Natesan, K., Isloor, S., Vinayagamurthy, B., Ramakrishnaiah, S., Doddamane, R., & Fooks, A. R. (2023). Developments in Rabies Vaccines: The Path Traversed from Pasteur to the Modern Era of Immunization. *Vaccines*. 11(4), 756. <https://doi.org/10.3390/vaccines11040756>

NOM-067-ZOO-2007 (2007). Campaña nacional para la prevención y control de la rabia en bovinos y especies ganaderas, en *Norma Oficial Mexicana*. [En línea]. Disponible en: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5190251&fecha=20/05/2011#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5190251&fecha=20/05/2011#gsc.tab=0). Fecha de consulta: 11 de agosto de 2024.

Olival, K. J., Hosseini, P. R., Zambrana-Torrel, C., Ross, N., Bogich, T. L., & Daszak, P. (2017). Erratum: Host and viral traits predict zoonotic spillover from mammals. *Nature*, 548(7669), 612.

Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., & Kassem, K. R. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. *Bio Science*, 51, 933-938.

Ortega-Sánchez, R., Bárcenas-Reyes, I., Cantó-Alarcón, G. J., Luna-Cozar, J., Rojas-Anaya, E., Contreras-Magallanes, Y. G., González-Ruiz, S., Cortez-García, B., & Milián-Suazo, F. (2022). Descriptive and Time-Series Analysis of Rabies in Different Animal Species in Mexico. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.800735>

Piaggio, A. J., Russell, A. L., Osorio, I. A., Jiménez Ramírez, A., Fischer, J. W., Neuwald, J. L., Tibbels, A. E., Lecuona, L., & McCracken, G. F. (2017). Genetic demography at the leading edge of the distribu-

tion of a rabies virus vector. *Ecology and Evolution*, 7, 5343-5351. <https://doi.org/10.1002/ece3.3087>

Picard, N., Köhler, P., Mortier, F., & Gourlet-Fleury, S. (2012). A comparison of five classifications of species into functional groups in tropical forests of French Guiana. *Ecological Complexity*, 11, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2012.03.003>

Ray, C. E., Linares, O. J., & Morgan, G. S. (1998). *Paleontology*. In Natural History of Vampire Bats. CRC Press, 19-30 Pp.

Rocha, F. & Dias, R. A. (2020). The common vampire bat *Desmodus rotundus* (Chiroptera: Phyllostomidae) and the transmission of the rabies virus to livestock: A contact network approach and recommendations for surveillance and control. *Preventive Veterinary Medicine*, 174, 104809. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2019.104809>

Rojas-Sereno, Z. E., Streicker, D. G., Medina-Rodríguez, A. T., & Benavides, J. A. (2022). Drivers of Spatial Expansions of Vampire Bat Rabies in Colombia. *Viruses*, 14(11), 2318. <https://doi.org/10.3390v14112318>

SSA, Secretaría de Salud (2020). Programa de acción específico de prevención y control de enfermedades zoonóticas y emergentes 2020-2024. Centro Nacional de Enfermedades Infecciosas. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/738300/PAE\\_Zoonosis.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/738300/PAE_Zoonosis.pdf)

SSA, Secretaría de Salud (2023). Secretaría de Salud difunde aviso epidemiológico sobre rabia humana. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/prensa/017-secretaria-de-salud-difunde-aviso-epidemiologico-sobre-rabia-humana?idiom=es> Fecha de consulta: 7 de octubre de 2024.

Scheffer, K. C., Barros, R. F., Iamamoto, K., Mori, E., Asano, K. M., Achkar, S. M., Estevez-García, A. I., Oliveira-Lima, J. Y., & Fahl, W. O. (2015). *Diphylloca ecaudata* y *Diaemus youngi*: Biología y comportamiento. *Acta Zoológica Mexicana*, 31(3), 436-445.

Scheffer, K. C., Barros, R. F., Iamamoto, K., Mori, E., Asano, K. M., Lima, J. Y. O., Garcia, A. I. E., Cunha-Neto, R. S., & Fahl, W. O. (2022). *Desmodus rotundus* – biología y comportamiento. In Open Science Research III. Editora Científica Digital. 505-529 Pp.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera / SIACON, Servicio de Información Agroalimentaria de Consulta (2023). Estadística de Producción Agrícola. [En línea]. Disponible en: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>. Fecha de consulta: 11 de noviembre de 2023.

Sil-Berra, L. M., Aguilar-López, M., Márquez-Medero, M. A. y Cervantes-Cruz, J. M. (2022). De México para el mundo... los murciélagos endémicos. *Therya Ixmana*, 1(1), 29-31.

Simmons, N. B., Cirranello, A. L., Bat, H., Bat, G. S., Gray, C., & Bot, M. Z. (2022). Bats of the World. *American Museum of Natural History*, 1-94.

SIRVERA, Sistema de Información Regional Para la Vigilancia Epidemiológica de la Rabia (2024). [En línea]. Disponible en: <https://sirvera.panaftosa.org.br/>. Fecha de consulta: 4 de septiembre de 2024.

Smith J. S. (1989) Rabies Virus Epitopic Variation: Use in Ecologic Studies. 215-253 Pp.

Smith J. S., Orciari, L. A., Yager, P. A., Seidel, H. D., & Warner, C. K. (1992). Epidemiologic and Historical Relationships among 87 Rabies Virus Isolates as Determined by Limited Sequence Analysis. *Journal of Infectious Diseases*, 166: 296-307. <https://doi.org/10.1093/infdis/166.2.296>

Streicker, D. G., Recuenco, S., Valderrama, W., Gomez-Benavides, J., Vargas, I., Pacheco, V., Condori-Condori, R. E., Montgomery, J., Rupprecht, C. E., Rohani, P., & Altizer, S. (2012). Ecological and anthropogenic drivers of rabies exposure in vampire bats: implications for transmission and control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279, 3384-3392. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.0538>

Thrusfield, M. (2005). Veterinary epidemiology Veterinary, Clinical Studies Royal (Dick) School of Veterinary Studies, Chapter 4. Describing disease occurrence (pp. 46-56). University of Edinburgh. Publisher Blackwell Science Ltd.

Van-de-Vuurst, P., Qiao, H., Soler-Tovar D, & Escobar, L. E. (2023). Climate change linked to vampire bat expansion and rabies virus spillover. *Ecography*, 1-10. <https://doi.org/10.1111/ecog.06714>

Vargas-Vázquez, V. A., Venegas-Barrera, C. S., Mora-Olivo, A., Martínez-Ávalos, J. G., Alanís-Rodríguez, E. y De-la-Rosa-Manzano, E. (2019). Variación en la abundancia de árboles maderables por efecto de borde en un bosque tropical subcaducifolio. *Botanical Sciences*. 97, 35-49. <https://doi.org/10.17129/botsci.2019>

Viana, M., Benavides, J. A., Broos, A., Ibañez-Loayza, D., Niño, R., Bone, J., da-Silva-Filipe, A., Orton, R., Valderrama-Bazan, W., Matthiopoulos, J., & Streicker, D. G. (2023). Effects of culling vampire bats on the spatial spread and spillover of rabies virus. *Science Advances*, 9(10), eadd7437.



Imagen tomada de: Canva educativo

# Asociación de índices de vegetación RGB con rendimiento y dosis de nitrógeno en trigo harinero

## Association of RGB vegetation indices with yield and nitrogen dose in bread wheat

Andrés Mandujano-Bueno<sup>1</sup>, Juan Francisco Buenrostro-Rodríguez<sup>2</sup>, Víctor Montero-Tavera<sup>1\*</sup>

### RESUMEN

El trigo (*Triticum aestivum*) es un cultivo industrial de primera importancia para México, autosuficiente en la producción de trigo cristalino, pero con déficit de 5 200 000 T anuales de trigo harinero. Esta problemática es multifactorial, algunos de los componentes más importantes son el diferencial entre el rendimiento actual y potencial, así como el manejo deficiente de la fertilización nitrogenada. El objetivo de esta investigación fue determinar si existe correlación significativa entre el Índice de Vegetación estimado a partir de ortofotos en luz visible con el rendimiento y las necesidades de nitrógeno del trigo harinero, para complementar o reemplazar el índice NDVI obtenido con el sensor infrarrojo GreenSeeker™, y contribuir con ello a la nutrición racional de las plantas. Se cultivó la variedad Alondra F2014 en Celaya, Guanajuato, México, y se aplicaron 6 tratamientos de fertilización nitrogenada (0 kg/ha a 300 kg/ha de nitrógeno, en incrementos de 60 kg) bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, durante los ciclos de cultivo OI 2021-2022 y OI 2022-2023. Las variables estimadas fueron rendimiento de grano, los índices de vegetación GLI, TGI, VARI, GRVI y RGBVI, calculados sobre ortofotos construidas a partir de imágenes obtenidas por un vehículo aéreo no tripulado, y el índice NDVI como testigo, medido con el sensor GreenSeeker™; todos ellos estimados semanalmente a partir de 20 d después de la siembra y hasta el inicio de la madurez fisiológica. Los resultados demuestran altos coeficientes de correlación  $\geq 0.90$  entre todas las variables; y altos coeficientes de determinación, promedio en la etapa de encañe inicial de 0.80 a 0.91 entre los índices RGB y NDVI, y ( $R^2$ )  $\geq 0.86$  entre índices VIV con el rendimiento. Los índices VIV, especialmente VARI, pueden emplearse en lugar del NDVI como herramienta para identificar eficientemente las necesidades del cultivo.

**PALABRAS CLAVE:** trigo harinero, rendimiento, nitrógeno fertilizado, índices de vegetación, ortofotos.

### ABSTRACT

Wheat (*Triticum aestivum*) is an industrial crop of primary importance for Mexico, self-sufficient in the production of durum wheat, but with a deficit of 5 200 000 T of bread wheat per year. This problem is multifactorial, some of the most important components are the difference between current and potential yield, as well as poor management of nitrogen fertilization. The objective of this research was to determine if there is a significant correlation between Vegetation Indices estimated from visible light orthophotos with the yield and nitrogen needs of bread wheat to complement or replace the NDVI indices obtained with the GreenSeeker™ infrared sensor, and thus contribute to the rational nutrition of plants. For this purpose, the Alondra F2014 variety was grown in Celaya, Guanajuato, Mexico and six nitrogen fertilization treatments were applied (0 kg/ha to 300 kg/ha of nitrogen, in increments of 60 kg) under a randomized complete block design with three repetitions, during the FW 2021-2022 and FW 2022-2023 crop cycles. The estimated variables were grain yield, the GLI, TGI, VARI, GRVI and RGBVI vegetation indices, calculated on orthophotos constructed from images obtained by an Unmanned Aerial Vehicle, and the NDVI indices as a control, measured with the GreenSeeker™ sensor; all of them were estimated weekly from 20 d after sowing and until physiological maturity. The results show high correlation coefficients,  $\geq 0.90$  between all variables, and high coefficients of determination average at the tillage stage from 0.80 to 0.91 between RGB and NDVI indices and ( $R^2$ )  $\geq 0.86$  between VIV indices and yield. Therefore, VIV indices, especially VARI, can be used instead of NDVI as a tool to efficiently identify crop needs.

**KEYWORDS:** bread wheat, yield, nitrogen fertilization, vegetation indices, orthophotos.

\*Correspondencia: [montero.victor@inifap.gob.mx](mailto:montero.victor@inifap.gob.mx)/Fecha de recepción: 23 de agosto de 2024/Fecha de aceptación: 28 de octubre de 2024/  
Fecha de publicación: 15 de noviembre de 2024.

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío, km 6.5, carretera Celaya-San Miguel de Allende s/n, Celaya, Guanajuato, México, C. P. 38110. <sup>2</sup>Centro Internacional para el mejoramiento de Maíz Trigo, El Batán Texcoco, Estado de México, México, C. P. 56237.

## INTRODUCCIÓN

El trigo en México es un cultivo muy importante tanto para la industria alimentaria como para la economía en general. Los principales tipos de trigo son el cristalino, que se usa en la elaboración de pastas; y el harinero, insumo primordial en la industria galletera y la panificación (de-Sousa y col., 2021). Aunque el país es autosuficiente en trigo cristalino, existe un grave déficit en la producción de harinero. En los últimos 5 años se cosecharon en promedio 1 732 969 T de trigo cristalino y solo 1 587 278 T de harinero, de acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023). Para cubrir el requerimiento nacional se necesita importar 5 200 millones de toneladas al año, lo cual representa un gasto anual de 2 066 millones de dólares (SIAP, 2024). En 2022 los principales estados productores fueron Sonora (con el 58 % del total de producción), Guanajuato (11.4 %) y Sinaloa (8.2 %) (SIAP, 2023).

El déficit en la producción de trigo harinero es muy complejo, pues su origen es multifactorial, ya que inciden elementos agronómicos, económicos, políticos y sociales. Entre los problemas agronómicos más importantes se encuentran los bajos rendimientos actuales (6.1 T/ha) comparados con los potenciales, que llegan hasta 10 T/ha (Solís-Moya y col., 2013), e incluso hasta 12 T/ha con las 7 mejores variedades para el valle del Yaqui en Sonora, México (Fischer y col., 2022). Entre los elementos que más contribuyen a incrementar la brecha entre rendimiento actual y potencial se encuentra la falta de variedades adaptadas a las diferentes regiones agroclimáticas y el manejo deficiente de la fertilización nitrogenada (van-Ittersum y col., 2013).

Con el fin de racionalizar la gestión del fertilizante nitrogenado, Raun y col. (2005) desarrollaron el Algoritmo de Optimización de Fertilizante Nitrogenado (NFOA, por sus siglas en inglés: Nitrogen Fertilization Optimization Algorithm), el cual predice las dosis de nitrógeno complementarias a la fertilización inicial aplicada en la siembra. El algoritmo re-

quiere el uso de una franja rica en nitrógeno (300 kg/ha) que se establece en el centro de la parcela y debe tener un ancho mínimo de 10 m por el largo de la misma, así como la estimación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés: Normalized Difference Vegetation Indices), que se basa en la reflectancia de la longitud de onda del infrarrojo cercano. El NFOA debe adecuarse para cada región agroclimática; por tal motivo Paredes-Melesio y col. (2014) lo adaptaron para la región del Bajío en México. Sin embargo, en esta región el empleo de una franja rica en nitrógeno es complicado, debido a la tenencia fraccionada y desagregada de la tierra, que es en promedio de 7 ha; por lo tanto, Mandujano-Bueno y col. (2023) propusieron una modificación al NFOA, que permite eliminar la franja rica con buenos resultados en cuanto a la predicción de requerimientos de nitrógeno.

Recientemente, el manejo de los cultivos empieza a incorporar una serie de herramientas que permiten gestionar puntualmente información de las plantas, principalmente mediante el uso de sensores remotos y el manejo de la información con la llamada Ciencia de los Datos (random forest, machine learning, redes neuronales, entre otros). A esta forma sistematizada de la adquisición de la información agrícola se le denomina “agricultura de precisión”. En términos prácticos, la agricultura de precisión permite gestionar de manera oportuna la información necesaria para que el agricultor aplique acciones correctivas o de seguimiento sobre la totalidad de la superficie cultivada o sobre subdivisiones de la misma, llegando incluso a nivel de una planta (Buters y col., 2019). De esta manera, es posible optimizar los insumos (suelo, fertilizante, agua, agroquímicos, entre otros) y maximizar los productos (grano, forraje, frutos, entre otros) (Singh, 2024).

Una de las herramientas que más desarrollo ha tenido en los últimos años, en el marco de la agricultura de precisión, es el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT),

popularmente conocidos como drones. Los VANT comerciales están equipados con una cámara RGB (Red Green Blue) con resolución de 4K que permite tomar fotografías de buena calidad y precisión, para usarlas como insumo en la construcción de ortofotos (imágenes áreas procesadas). Las ortofotos son útiles para estudios de fotogrametría y cálculo de índices de vegetación basados en luz visible (VVI, por sus siglas en inglés: Visible Vegetation Indices), los cuales están diseñados para detectar el verdor y el área del follaje de las plantas. A la fecha, se han desarrollado alrededor de 150 VIV, entre los más usados destacan, el Índice de Hoja Verde (GLI, por sus siglas en inglés: Green Leaf Indices) (Louhaichi y col., 2001), Índice Visible de Resistencia Atmosférica (VARI, por sus siglas en inglés: Visible Atmospherically Resistant Indices) (Gitelson y col., 2002), Índice de Verdor Triangular (TGI, por sus siglas en inglés: Triangular Greenness Indices) (de-Ocampo y col., 2019) e Índice de Vegetación Azul Verde Rojo (RGBVI, por sus siglas en inglés: Red Green Blue Vegetation Indices) (Bendig y col., 2013).

Con los VANT y VIVs se ha estudiado el desarrollo de enfermedades (Gongora-Canull y col., 2019), estimación de producción de forraje (Lussem y col., 2018), estatus hídrico de plantas (Walsh y col., 2020), nitrógeno en plantas (Gordillo-Salinas y col., 2021) y respuesta de la producción a diferentes tipos de labranza (Balážová y col., 2021), entre otros aspectos.

El objetivo de esta investigación fue determinar si existe correlación significativa entre Índices de Vegetación estimados a partir de ortofotos de luz visible con el rendimiento de trigo harinero, con el fin de contribuir a una nutrición vegetal racional, además de complementar o sustituir el índice NDVI obtenido con el sensor Greenseeker™.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material genético y área de estudio

Se seleccionó la variedad de trigo harinero *Triticum aestivum* de gluten fuerte Alondra F2014,

liberada en 2016 por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Alondra es un genotipo de alto rendimiento, y elevado nivel de resistencia a roya lineal amarilla, roya de la hoja y de alta calidad industrial (Solís-Moya y col., 2016).

En cada ciclo agrícola otoño-invierno de los años 2022 y 2023 se estableció un lote experimental de trigo harinero en el Campo Experimental Bajío del INIFAP ubicado en Roque, municipio de Celaya, Guanajuato, México. Las parcelas se establecieron en suelo tipo vertisol, representativo del Bajío (que abarca los estados de Guanajuato, Querétaro, Aguascalientes y San Luis Potosí), con coordenadas 20°34'59" N y 100°49'30" W y altitud de 1 767 msnm. En esta localidad el clima es cálido y templado, con temperatura promedio de 18.3 °C. En comparación con el invierno, los veranos tienen mucha más lluvia, con precipitaciones de 689 mm. La clasificación climática de Köppen-Geiger modificado por García (2004) identifica este patrón de clima como perteneciente a la categoría Cwa.

### Diseño experimental

Durante dos años consecutivos se evaluaron 6 tratamientos de fertilización: 0 kg/ha, 60 kg/ha, 120 kg/ha, 180 kg/ha, 240 kg/ha y 300 kg/ha de N, aplicados al momento de la siembra, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Estas dosis son iguales a las empleadas por Paredes-Melesio y col. (2014) en sus trabajos de calibración del sensor infrarrojo GreenSeeker™, USA e incluyen las cantidades típicas aplicadas por el productor. Cada unidad experimental fue de 3 camas de 1.5 m de ancho y 5 m de largo, sembradas con 4 hilos de cultivo.

### Manejo agronómico

El manejo agronómico fue el óptimo recomendado para el Bajío (Solís-Moya y col., 2013), excepto por las dosis variables de nitrógeno. Con el fin de reducir la interferencia por deficiencia de nutrientes diferentes al nitrógeno en todas las unidades experimentales se apli-

caron los siguientes nutrientes: P (60 kg/ha), K (30 kg/ha), Zn (1.50 kg/ha), Fe (0.50 kg/ha), Mn (0.10 kg/ha), Cu (0.10 kg/ha), B (0.15 kg/ha) y Mo (0.02 kg/ha). Las fuentes de fertilización fueron fosfato diamónico, cloruro de potasio, sulfato de zinc, sulfato de fierro y Micromix concentrado®. Los experimentos se establecieron el 23 de diciembre de 2021 y 10 de enero de 2023, correspondientes a los ciclos agrícolas (OI 2021-2022 y OI 2022-2023). La cantidad de semilla sembrada fue de 120 kg/ha. Los riegos se suministraron a través del sistema de compuertas a los 0 d, 45 d, 75 d y 100 d después de la siembra (dds).

### Captura de imágenes y estimación de Índices de Vegetación

Cada 7 d, durante 13 semanas en cada ciclo e iniciando a los 20 dds y hasta el inicio de la etapa de madurez fisiológica, se capturaron fotografías de luz visible con un VANT de la marca DJI® modelo Phantom 3 PRO® (Shenzhen, China), equipado con una cámara RGB 4K de 1/2.3" CMOS, con resolución de 12.4 megapíxeles.

Para determinar el efecto de la altura a la cual se toman las fotografías sobre la estimación de los VIV se consideraron dos altitudes de vuelo: 15 m y 50 m sobre el nivel del suelo, lo que produjo una Distancia de Muestreo del Suelo (GSD, por sus siglas en inglés: Ground Sample Distance) de 0.65 m y 2.15 m.

Las misiones de vuelo se programaron mediante la aplicación para Android DJI Pilot® 2020, versión 1.8.1. con los siguientes parámetros: velocidad de despegue 5 m/s, velocidad de vuelo 1 m/s (para vuelos a 15 m) y 3 m/s (para vuelos a 50 m) e intervalo entre fotografías de 2 s. De esta manera, se obtuvieron en promedio 120 fotografías en los vuelos a 15 m, y 50 en los vuelos a 50 m. Todos los vuelos se hicieron a las 12:00 horas para evitar el exceso de sombras.

Con el total de fotografías obtenidas en cada vuelo se procedió a la construcción de ortofotos mediante el programa WebODM®, versión 2.5.5, las cuales se utilizaron posteriormente

para calcular los VIV en cada unidad experimental, con base en los valores de reflectancia de los colores rojo, verde y azul. Las ortofotos se prepararon en el programa fotográfico de código abierto Programa de Manipulación de Imágenes GNU® (GIMP, por sus siglas en inglés: Image Manipulation Program), versión 2.10.38 y las reflectancias se calcularon a través del *script* RGB *measure* del programa de edición de imágenes científicas ImageJ®, versión 1.54 (Schneider y col., 2012).

Los VIV estimados fueron: GLI (Louhaichi y col., 2001), TGI (de-Ocampo y col., 2019), VARI (Gitelson y col., 2002), RGBVI (Bendig y col., 2013) e Índice de Vegetación Verde Rojo (GRVI, por sus siglas en inglés: Green Red Vegetation Indices) (Tucker, 1979). Para validar la efectividad de los VIV se registraron los valores NDVI (Rouse y col., 1973) del dosel vegetal de cada unidad experimental con un sensor óptico (GreenSeeker™ Handheld Crop Sensor, modelo HCS-100 Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, California, USA), en las mismas fechas y en los mismos horarios en que se tomaron las imágenes de la cámara RGB del VANT. El NDVI se midió entre 60 cm y 90 cm sobre el dosel vegetal del trigo con un diámetro mayor de lectura de 50 cm, lo que define un ángulo de medición de 45°. En el caso de las ortofotos, se consideró como parcela útil la totalidad de la superficie de la unidad experimental, mientras que para la toma de los datos NDVI se consideraron los 4 m centrales de las 3 camas, donde cada cama fue una repetición.

### Análisis estadístico

Con los valores calculados para cada VIV se construyeron gráficas para observar su comportamiento a lo largo del ciclo del cultivo y compararlos con el del NDVI, así se identificó la mejor etapa del cultivo para determinar la dosis de fertilización nitrogenada, de acuerdo con los criterios establecidos por Mandujano-Bueno y col. (2023). Para identificar el VIV que mejor se correlacionó con el rendimiento se tomaron como base sus valores promedio en cada tratamiento para aplicar

análisis de correlación de Pearson, además se determinaron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) a través de análisis de regresión empleando el valor promedio de cada VIV como variable independiente y rendimiento de grano como variable dependiente.

Adicionalmente, se realizaron análisis de correlación de Pearson, así como regresión lineal simple, empleando el NDVI como variable independiente y cada uno de los VIV como variable dependiente para evaluar el nivel de ajuste entre dichos índices y determinar si alguno de ellos podría reemplazar al NDVI en la predicción de dosis de fertilización nitrogenada.

Al finalizar el ciclo de cultivo se cosechó cada unidad experimental, el grano se pesó y se determinó el porcentaje de humedad para ajustarlo al 13 %; con estos datos se calculó el rendimiento de grano en kg/ha. Para estudiar el rendimiento total en los diferentes tratamientos y años se realizó un análisis de varianza combinado y comparación de medias de Tukey empleando el software estadístico Sistema de Análisis Estadísticos versión 9.3 (SAS, por sus siglas en inglés: Statistical Analysis System).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Rendimiento de grano en función de la cantidad de nitrógeno aplicado

El análisis de varianza del rendimiento de gra-

no presentó diferencias altamente significativas, tanto para años como para tratamientos (Tabla 1). Aunque las diferencias entre años (ciclos OI 2021-2022 y OI 2022-2023) fueron grandes (9.3 T/ha vs 4.8 T/ha), la tendencia de la respuesta entre tratamientos fue similar. En ambos años hubo una tendencia a incrementar pronunciadamente el rendimiento en los tratamientos de 0 kg/ha hasta 120 kg/ha de N y a partir de 180 kg/ha el incremento fue marginal (Tabla 2).

La comparación de medias entre años indicó que 2022 fue el año más productivo, con una diferencia cercana al 100 % (Tabla 2). La diferencia entre años se atribuye a la variación en condiciones ambientales, principalmente del suelo y fecha de siembra.

El suelo donde se sembró en 2022 fue de tipo vertisol de textura arcillosa, pH de 7.4 y 2.1 de materia orgánica, mientras que el de 2023 fue franco arcilloso del tipo vertisol, pH ligeramente alcalino de 7.8, con 1.41 % de materia orgánica. El contenido de nutrientes minerales se muestra en la Tabla 3.

En términos generales, el suelo en 2022 fue más fértil y con más materia orgánica que en 2023, lo que podría explicar en parte las diferencias en rendimiento observadas entre los 2 años. Por otra parte, las fechas de siembra fueron diferentes por 18 d, la del ciclo OI 2022-2023 fue la más tardía, lo que pudo

■ **Tabla 1.** Análisis de varianza combinado para rendimiento de grano de trigo de la variedad Alondra sometida a seis dosis crecientes de fertilización nitrogenada.

Table 1. Combined analysis of variance for wheat grain yield of the Alondra cultivar subjected to six increasing doses of nitrogen fertilization.

Fuentes de Variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Año	1	187.23*
Repeticiones/años	4	0.10 <sup>ns</sup>
Tratamientos	5	19.51*
Año x Tratamiento	5	1.53*
Error	20	1.08 <sup>ns</sup>
<b>CV Tratamiento (%)</b>		8.85

CV = Coeficiente de variación, \*significativo ( $P \leq 0.05$ ), ns = no significativo.

■ **Tabla 2. Comparación de medias de rendimiento de grano de trigo fertilizado con dosis crecientes de nitrógeno de 0 kg a 300 kg.**

Table 2. Comparison of average grain yields of wheat fertilized with increasing doses of nitrogen from 0 kg to 300 kg.

Tratamiento	Rendimiento de grano (T/ha)
<b>Dosis de N</b>	
0 kg/ha de N	4.0 <sup>c</sup>
60 kg/ha de N	6.0 <sup>b</sup>
120 kg/ha de N	7.3 <sup>ab</sup>
180 kg/ha de N	8.0 <sup>a</sup>
240 kg/ha de N	8.6 <sup>a</sup>
300 kg/ha de N	8.5 <sup>a</sup>
DMSH	1.1
<b>Años</b>	
2022	9.3 <sup>a</sup>
2023	4.8 <sup>b</sup>
DMSH	1.5

<sup>a, b, c</sup>Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamiento (dosis de N o años) ( $P \leq 0.05$ ).

implicar que el cultivo de este ciclo se viera expuesto a temperaturas más altas durante las etapas de espigamiento y llenado de grano con respecto al ciclo OI 2021-2022, induciendo a un menor rendimiento en este ciclo.

En la expresión del rendimiento, inducida por la cantidad de nitrógeno, la prueba de comparación de medias ( $P \leq 0.05$ , Tabla 2) demostró que los mayores rendimientos se encontraron a partir de 120 kg/ha, sin embargo, dosis superiores no resultaron en rendimientos estadísticamente más altos. Dichos resultados son similares a los reportados por Walsh y col. (2020), quienes demostraron que conforme se incrementa la disponibilidad de agua y de nitrógeno, el rendimiento de trigo se incrementa. En su estudio, encontraron que 150 kg/ha de N (incluyendo el nitrógeno residual en suelo más el fertilizante agregado) fue suficiente para optimizar el rendimiento y el contenido de proteína del grano. Los resultados evidencian la importancia de evitar

aplicaciones en exceso de N; el aplicar la dosis adecuada maximiza el rendimiento y además ayuda a reducir la contaminación ambiental y mejorar la rentabilidad del cultivo. Aunque la relación dosis de nitrógeno-rendimiento en trigo se ha estudiado desde al menos 7 décadas bajo la consideración de la ley de rendimientos decrecientes (donde se analizan dosis de fertilización óptima sin variar otros factores), es importante determinar estas dosis con cada nueva variedad, dependiendo del tipo de suelo o la región agroclimática donde se cultiva (Burton y col., 2024; Hnizil y col., 2024); por lo que esta debe ser una acción rutinaria de los programas de mejoramiento de trigo con el fin de generar paquetes tecnológicos adecuados.

### Correlación de VIV, NDVI y rendimiento de grano

En la Tabla 4 se muestran los valores promedio de los coeficientes de correlación de Pearson entre todas las variables para los dos ciclos, es decir, la asociación existente entre los VIV, el NDVI y el rendimiento de grano por cada ciclo de cultivo.

La correlación del NDVI con el rendimiento fue alta (0.924). Actualmente, este indicador es considerado como valor de referencia para estimar rendimientos de cosecha. Los resultados obtenidos concuerdan con Walsh y col. (2022) para betabel, Kaya y col. (2023) para trigo y Tamás y col. (2023) en maíz, entre otros. A su vez, es posible apreciar que los diferentes índices de VIV tuvieron un valor de correlación  $\geq 0.943$  con el indicador NDVI y un valor  $\geq 0.905$  con el rendimiento, lo que indica que, los VIV determinados a través de imágenes aéreas pueden usarse como alternativa o complemento al NDVI estimado a nivel de suelo con el Greenseeker™.

### Predicción de rendimiento y dosis de fertilizante nitrogenado

Los valores de VIV obtenidos con vuelos del VANT a 50 m de altura se correlacionaron mejor con el NDVI que los obtenidos a 15 m,

■ **Tabla 3. Análisis de contenido de nutrientes minerales en suelos de las parcelas experimentales en los años 2022 y 2023.**

Table 3. Analysis of mineral nutrient content in soils of the experimental plots in the years 2022 and 2023.

Mineral	2022	2023
	Concentración (ppm)	Concentración (ppm)
Nitrógeno	25.3	14.9
Fósforo	22	26
Potasio	650	823
Calcio	4 500	3 420
Magnesio	826	389
Sodio	241	401
Hierro	8.3	5.4
Zinc	1.1	0.7
Manganeso	8.1	6.3
Cobre	0.85	0.65
Boro	3.1	2.16

■ **Tabla 4. Coeficientes de correlación promedio entre las variables estimadas en los ciclos OI 2021-2022 y OI 2022-2023 ( $P \leq 0.01$ ).**

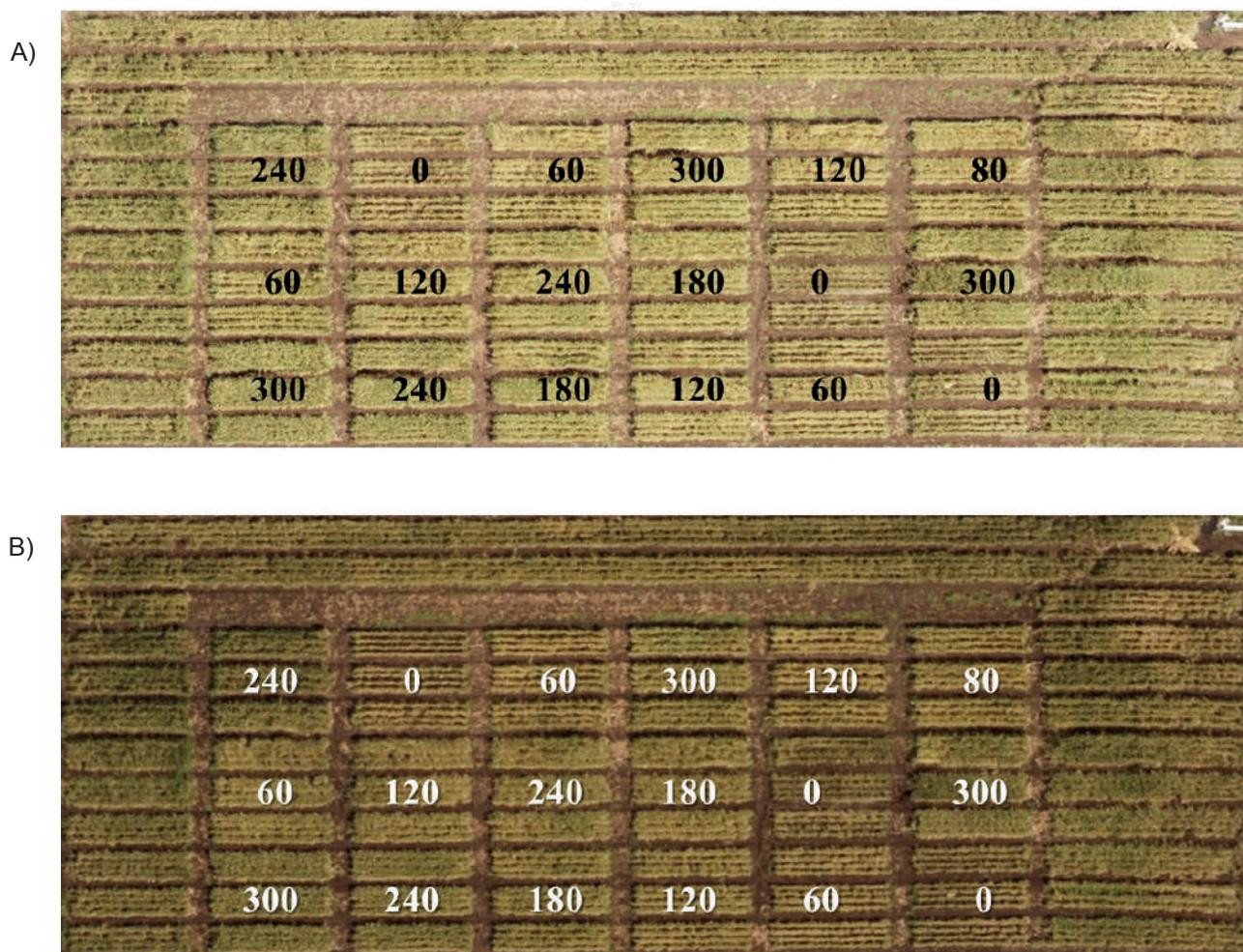
Table 4. Average correlation coefficients between the variables estimated in the FW 2021-2022 and FW 2022-2023 cycles ( $P \leq 0.01$ ).

	NDVI	GLI 50	RGBVI	GRVI	VARI	TGI	Rendimiento
NDVI	1	0.946	0.946	0.946	0.943	0.944	0.924
GLI 50		1	0.999	0.999	0.996	0.995	0.928
RGBVI			1	0.999	0.990	0.998	0.917
GRVI				1	0.996	0.995	0.929
VARI					1	0.983	0.945
TGI						1	0.905
Rendimiento							1

debido probablemente a la diferencia de luminosidad captada a diferentes alturas, como el ejemplo de la Figura 1, que es una ortofoto representativa de cada altura de vuelo, con diseños de parcelas similares en los 2 ciclos (OI 2021-2022 y OI 2022-2023). Los valores globales de VIV reportados a 50 m de altura permitieron que el coeficiente de determinación que ajusta su modelo fuera mayor; por ejemplo, entre NDVI y TGI a 50 m fue de 0.860, mientras que a 15 m fue de 0.798 (datos no mostrados). Por esta razón, todos los análisis y comparaciones, que se muestran a continuación, se realizaron considerando los VIV obtenidos con vuelos a 50 m,

donde los valores de los coeficientes de determinación con el rendimiento fueron superiores a 0.86.

Los valores más altos en los VIV (Figura 2) se registraron en la etapa de encañe inicial, que corresponde a la etapa 6 de Feekes (Large y col., 1954) y a la etapa 3.1 de Zadoks y col. (1974), mientras que los menores fueron en la etapa de madurez fisiológica (Feekes 11, Zadoks 9). Esta tendencia es similar a la que registraron los valores NDVI (Figura 2F), lo que demuestra la posibilidad de utilizar los VIV generados con el VANT de la forma en que se ha utilizado el NDVI para estimar el rendimiento



■ Figura 1. Imágenes ortorectificadas representativas del experimento OI 2021-2022. A) Vuelo del VANT a 15 m de altura. A) Vuelo del VANT a 50 m. Cada tratamiento incluye tres camas. Los números en el centro de la cama indican el tratamiento en kg/ha de nitrógeno, las repeticiones se aleatorizaron en cada bloque. Alrededor de la parcela experimental se encuentran bordes de la misma variedad.

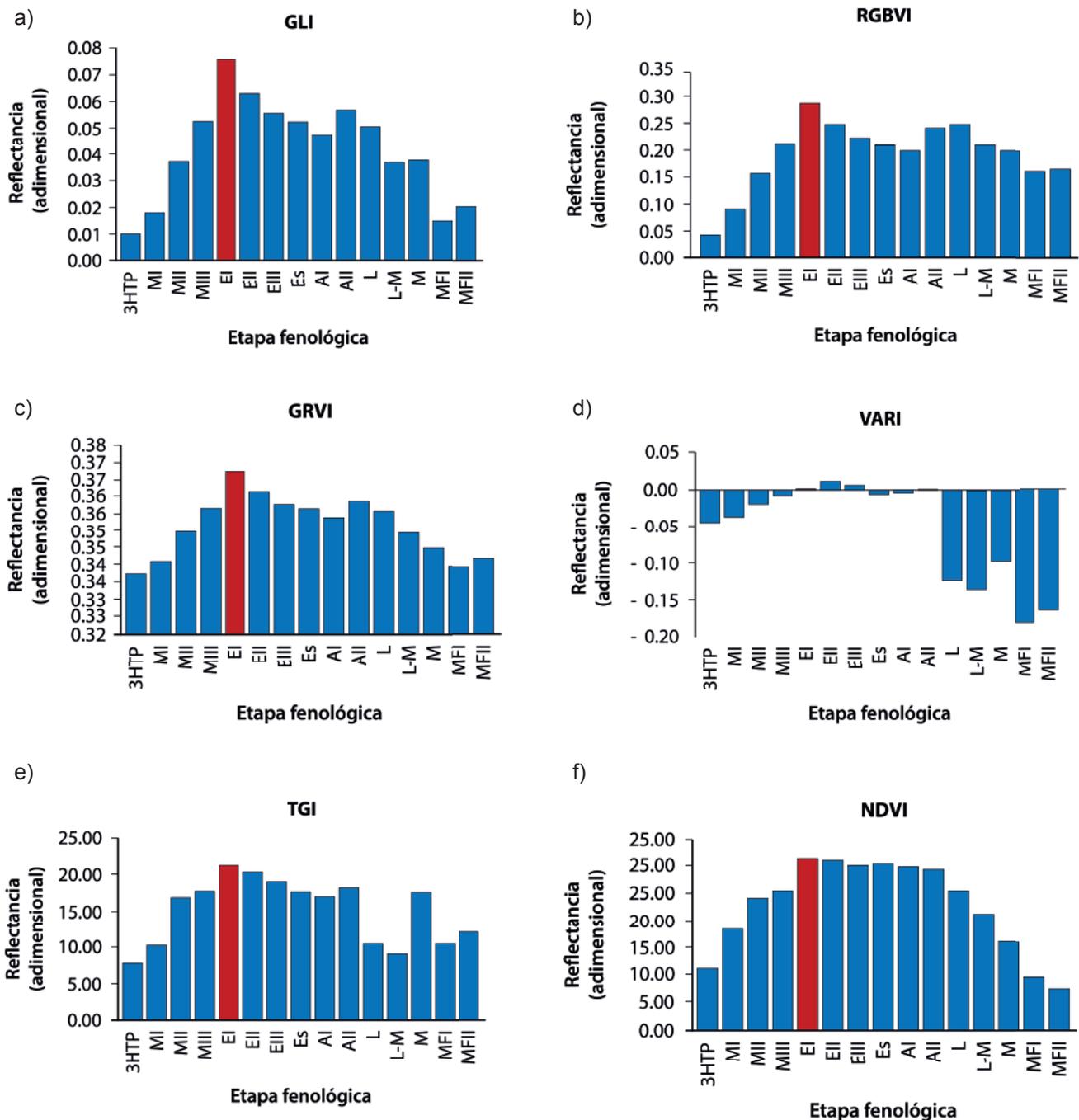
Figure 1. Representative orthorectified images of the 2021-2022 FW experiment. A) UAV flight at 15 m height. B) UAV flight at 50 m. Each treatment includes three beds. The numbers in the center of the bed indicate the treatment in kg/ha of nitrogen, the repetitions were randomized in each block. Surrounding the experimental plot are borders of the same variety.

de grano y para calcular dosis de fertilización nitrogenada en la etapa de encañe inicial, tal como lo proponen Mandujano-Bueno y col. (2023).

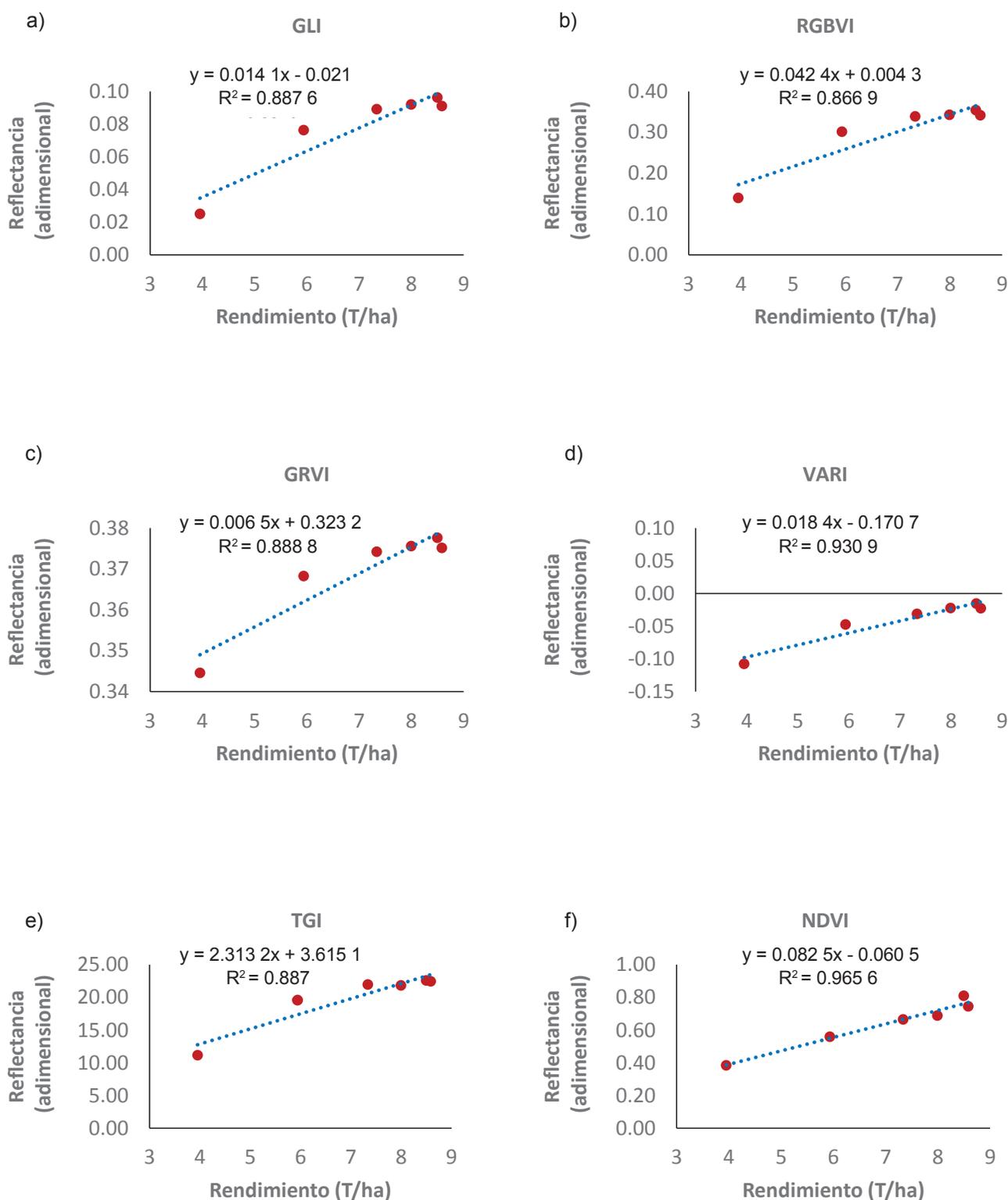
Aula y col. (2020), en una amplia revisión de 26 artículos que incluían el uso de sensores remotos y su relación con dosis de nitrógeno y rendimiento de grano, concluyeron que, en condiciones de rendimiento similar, el empleo de índices de vegetación permitió el ahorro

de hasta 69 kg/ha de N comparado con los métodos convencionales. Walsh y col. (2020) encontraron que el NDVI explicó el 84 % de la variación en el rendimiento de trigo. Aula y col. (2021) reportaron un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.79; por lo tanto, es posible el empleo indistinto del NDVI o los VIV, principalmente VARI.

En experimentos previos, los autores de este trabajo demostraron que el GLI se correla-



■ Figura 2. Comportamiento promedio de los índices de vegetación a través de las etapas fenológicas comprendidas en el estudio en los diferentes tratamientos. Se resalta el valor del encañe inicial. 3HTP = tres hojas en tallo principal, MI = amacollamiento inicial, MII = amacollamiento intermedio, MIII = amacollamiento final, EI = encañe inicial, EII = encañe intermedio, EIII = encañe final, Es = espigamiento, AI = inicio de antesis, AII = antesis, L = grano lechoso, L-M = grano lechoso masoso, M = grano masoso, MFI = madurez fisiológica, MFII = madurez mecánica. Figure 2. Average behavior of the vegetation indices through the phenological stages included in the study in the different treatments. The value of the initial ear formation is highlighted. 3HTP = three leaves on main stem, MI = initial tillering, MII = intermediate tillering, MIII = final tillering, EI = initial ear formation, EII = intermediate ear formation, EIII = final ear formation, Es = heading, AI = beginning of anthesis, AII = anthesis, L = milky grain, L-M = milky doughy grain, M = doughy grain, MFI = physiological maturity, MFII = mechanical maturity.



■ Figura 3. Gráficas de regresión entre los índices de vegetación calculados a partir de las imágenes del VANT en la etapa de encañe inicial y el rendimiento de grano de trigo fertilizado con dosis crecientes de N de 0 a 300 kg/ha.

Figure 3. Regression plots between vegetation indices calculated from UAV images at initial ear formation stage and grain yield of wheat fertilized with increasing doses of N from 0 to 300 kg/ha.

ciona en más de 80 % con el rendimiento de 13 variedades de trigo (Montero y col., 2021). Por otra parte, el análisis de correlación complementado con el de regresión entre el NDVI y los VIV dio como resultado un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.89 entre NDVI y los VIV, GLI, RGVBI y GRVI, es decir, que 89 % de la variación observada en el NDVI puede explicarse por los resultados obtenidos con estos VIV. Los coeficientes de correlación de todos los índices entre sí y con el rendimiento tienen valores altos  $\geq 0.90$  (Tabla 4). Esto significa que los VIV pueden emplearse indistintamente entre sí y en lugar del NDVI. Al respecto, los coeficientes de determinación promedio, obtenidos de los dos ciclos en la etapa de encañe inicial, entre NDVI y los diferentes VIV, presentaron los siguientes valores: 0.898 con GLI, 0.882 con RGVBI, 0.809 5 con GRVI, 0.914 5 con VARI y 0.856 con TGI. Esto significa que los VIV explicaron desde 80 % (GRVI) hasta 91 % (VARI) de la varianza observada en el NDVI en esta etapa fenológica. También los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para los modelos que relacionaron los índices GLI (0.887 6), GRVI (0.888 8) y VARI (0.930 9) con el rendimiento, calculados en la etapa de encañe inicial, fueron altos y cercanos al coeficiente de determinación entre NDVI y rendimiento global reportado (0.965 6) (Figura 3). Los coeficientes de determinación calculados empleando los promedios de todo el ciclo de cultivo, resultaron no menores a 0.94 en todos los casos. Esto confirma la utilidad de estos VIV para

estimar el rendimiento de grano y eventualmente sustituir el uso actual del NDVI.

## CONCLUSIONES

Los Índices de Vegetación de luz visible (VIV), particularmente VARI, estimados en vuelos a 50 m de altura se correlacionaron con el rendimiento, requerimientos de fertilizante nitrogenado y el índice NDVI estimado con el sensor GreenSeeker™, particularmente en la etapa de encañe inicial, por lo que pueden emplearse de manera complementaria o sustituyendo con alto grado de confianza al NDVI; aunque es importante probar estos índices con más variedades de trigo y en más ambientes. La aplicación de los VIV permite predecir adecuadamente el rendimiento de grano y las dosis de nitrógeno que se deben aplicar en el reabono en la etapa fenológica de encañe inicial.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) por el financiamiento al proyecto “Respaldo científico a la plataforma de investigación Acámbaro durante 2022” con número SAS-2022-336 y número SIGI 12142936174.

## DECLARACIÓN DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflicto de interés alguno.

---

## REFERENCIAS

- Aula, L., Omara, P., Nambi, E., Oyebiyi, F. B., & Raun, W. R. (2020). Review of active optical sensors for improving winter wheat nitrogen use efficiency. *Agronomy*, 10, 1157. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081157>
- Aula, L., Omara, P., Nambi, E., Oyebiyi, F. B., Dhillon, J., Eickhoff, E., Carpenter, J., & Raun, W. R. (2021). Active optical sensor measurements and weather variables for predicting winter wheat yield. *Agronomy Journal*, 113, 2742-2751. <https://doi.org/10.1002/agj2.20620>
- Balážová, K., Chyba, J., Kumhálová, J., Mašek, J., & Petrásek, S. (2021). Monitoring of Khorasan (*Triticum turgidum* ssp. *turanicum*) and modern Kabot spring wheat (*Triticum aestivum*) varieties by UAV and sensor technologies under different soil tillage. *Agronomy*, 11, 1348. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071348>
- Bendig, J., Bolten, A., & Bareth, G. (2013). UAV-based imaging for multitemporal, very high resolution crop surface models to monitor crop growth variability. PFG *Photogrammetrie, Fernerkundung,*

*Geoinformation*, 6, 551-562.

Burton, A., Häner, L. L., Schaad, N., Strebel, S., Vuille-dit-Bille, N., de-Figueiredo, B. P., Holzkämper, A., Pellet, D., & Herrera, J. M. (2024). Evaluating nitrogen fertilization strategies to optimize yield and grain nitrogen content in top winter wheat varieties across Switzerland. *Field Crops Research*, 307, 109251.

Buters, T. M., Belton, D., & Cross, A. T. (2019). Multisensor UAV tracking of individual seedlings and seedling communities at millimeter accuracy. *Drones*, 3, 81.

De-Ocampo, A. L. P., Bandala, A. A., & Dadios, E. P. (2019). Estimation of triangular greenness index for unknown peak wavelength sensitivity of CMOS-acquired crop images. In 2019 IEEE 11th *International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)* (pp. 1-5). IEEE.

De-Sousa, T., Ribeiro, M., Sabença, C., & Igrejas, G. (2021). The 10,000-year success story of wheat! *Foods*, 10, 2124. <https://doi.org/10.3390/foods10092124>

Fischer, T., Ammar, K., Monasterio, I. O., Monjardino, M., Singh, R., & Verhulst, N. (2022). Sixty years of irrigated wheat yield increase in the Yaqui Valley of Mexico: past drivers, prospects and sustainability. *Field Crops Research*, 283, 108528. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108528>

García, de M. E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía Serie Libros Núm. 6. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gitelson, A. A., Stark, R., Grits, U., Rundquist, D., Kaufman, Y., & Derry, D. (2002). Vegetation and soil lines invisible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 2537-2562. <https://doi.org/10.1080/01431160110107806>

Gongora-Canul, C., Salgado, J. D., Singh, D., Cruz, A. P., Cotrozzi, L., Couture, J., Rivadeneira, M. G., Cruppe, G., Valent, B., Todd, T., Poland, J., & Cruz, C. D. (2019). Temporal dynamics of wheat blast epidemics and agreement between remotely sensed data measurements and visual estimations of wheat spike blast (WSB) under field conditions. *Phytopathology*, 110, 393-405.

Gordillo-Salinas, V. M., Flores-Magdaleno, H., Ortiz-Solorio, C. A., & Arteaga-Ramírez, R. (2021). Evaluation of nitrogen status in a wheat crop using unmanned aerial vehicle images. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 81, 408-419. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392021000300408>

Hnizil, O., Baidani, A., Khlila, I., Nsarellah, N., & Amamou, A. (2024). Assessing the impact of nitrogen fertilization, variety selection, year and their interaction on wheat yield and yield components. *Nitrogen*, 5, 266-287.

Kaya, Y. & Polat, N. (2023). A linear approach for wheat yield prediction by using different spectral vegetation indices. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8, 52-62. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1035037>

Large, E. C. (1954). Growth stages in cereals. Illustration of the Feekes scale. *Plant Pathology*, 3, 128-129.

Louhaichi, M., Borman, M. M., & Johnson, D. E. (2001). Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International*, 16, 65-70. <https://doi.org/10.1080/10106040108542184>

Lussem, U., Bolten, A., Gnyp, M. L., Jasper, J., & Bareth, G. (2018). Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in Grassland. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 1215-1219. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1215-2018>

Mandujano-Bueno, A., Paredes-Melesio, R., Buenrostro-Rodríguez, J. F., de-la-O-Olán, M., Ortiz-Monasterio, I., Gámez-Vázquez, A. J., Inurreta-Aguirre, H. D. y Montero-Tavera, V. (2023). Algoritmo simplificado para aplicación racional de nitrógeno en trigos harineros en el Bajío mexicano. *Revista Fitoecnia Mexicana*, 46, 255-255. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.3.255>

Montero, T. V., Ledesma, R. L., Rodríguez, V. A. P., Bravo, G. F. de J. y Solís, M. E. (2021). Evaluación de Índices de Vegetación de luz visible y su correlación con cobertura y rendimiento de trigo, en *XI Reunión Nacional de Investigación Agrícola. Memoria*. [En línea]. Disponible en: [http://reunionescientificas2021.inifap.gob.mx/\\_media/CONVOCATORIAS/MEMORIA\\_AGR%C3%8DCOLA.pdf](http://reunionescientificas2021.inifap.gob.mx/_media/CONVOCATORIAS/MEMORIA_AGR%C3%8DCOLA.pdf). Fecha de consulta: 21 de octubre de 2024.

Paredes-Melesio, R., Mandujano-Bueno, A., Buen-

rostro-Rodríguez, J. F., Jaralillo-López, G. y Alamilla, G. M. P. (2014). Estimación de la dosis óptima de fertilización nitrogenada mediante el uso del sensor portátil GreenSeeker™ en Guanajuato. En A. Mandujano, R. Paredes, P. Alamilla y J. F. Buenrostro (Eds.), *Guía para la producción de maíz, frijol, trigo y sorgo en Guanajuato* (pp. 92-101). Libro Técnico No. 4. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Celaya, Guanajuato. México.

Raun, W. R., Solie, J. B., Stone, M. L., Martin, K. L., Freeman, K. W., Mullen, R. W., Zhang, H., Schempers, J. S., & Johnson, G. V. (2005). Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 2759-2781. <https://doi.org/10.1080/00103620500303988>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium. *NASA Special Publications*, 351(1), 309. <https://doi.org/19740022614>

Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9, 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023). Panorama Agroalimentario 2023. Agricultura Ed. SIAP. Ciudad de México. 215 Pp.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2024). Avance agrícola. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2024.

Singh, V. (2024). Advances in Precision Agriculture Technologies for Sustainable Crop Production. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30, 1-71.

Solís-Moya, E., Huerta-Espino, J., Pérez-Herrera, P., Villaseñor-Mir, H. E., Ramírez-Ramírez, A. y de-la-Cruz-González, M. de L. (2016). Alondra F2014, nueva variedad de trigo harinero para el Bajío, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7, 12 25-1229.

Solís-Moya, E., Ramírez-Ramírez, A., Ledesma-Ramírez, L. y de-la-Cruz-González, M. L. (2013). Guía para la producción de maíz, frijol, trigo y sorgo en Guanajuato. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico*, (4), 113-119.

Tamás, A., Kovács, E., Horváth, É., Juhász, C., Radócz, L., Rátonyi, T., & Ragán, P. (2023). Assessment of NDVI dynamics of maize (*Zea mays* L.) and its relation to grain yield in a polyfactorial experiment based on remote sensing. *Agriculture*, 13, 689. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030689>

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

Van-Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research*, 143, 4-17.

Walsh, O. S., Nambi, E., Shafian, S., Jayawardena, D. M., Ansah, E. O., Lamichhane, R., & McClintick-Chess, J. R. (2023). UAV-based NDVI estimation of sugarbeet yield and quality under varied nitrogen and water rates. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 6(1), e20337. <https://doi.org/10.1002/agg2.20337>

Walsh, O. S., Torrion, J. A., Liang, X., Shafian, S., Yang, R., Belmont, K. M., & McClintick-Chess, J. R. (2020). Grain yield, quality, and spectral characteristics of wheat grown under varied nitrogen and irrigation. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3(1), e20104. <https://doi.org/10.1002/agg2.20104>

Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415-421.



Imagen tomada de: Canva educativo

# Evaluación de desempeño de controladores para un sistema de dedo biónico

## Performance evaluation of controllers for a bionic finger system

Erick Javier Sánchez-Garnica<sup>1</sup>, Liliam Rodríguez-Guerrero<sup>1\*</sup>, Rocío Ortega-Palacios<sup>2</sup>, Omar Jacobo Santos-Sánchez<sup>1</sup>

### RESUMEN

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de dispositivos para suplir la pérdida de un miembro del cuerpo, sin embargo, su costo actual todavía los hace inaccesibles para personas de escasos recursos y, en muchos casos, incluso con ingresos moderados. Existe un amplio desarrollo tanto científico, como aficionado, de dedos biónicos, pero es común que no se considere alguna técnica de control para manipularlos. El objetivo del presente estudio fue evaluar el desempeño de cuatro tipos de controladores de lazo cerrado, en el funcionamiento estable de un dedo biónico. Se trabajó con los controladores proporcional más compensación, proporcional óptimo más compensación, proporcional integral por asignación de polos y proporcional integral por Ziegler-Nichols, en un dedo biónico adaptado específicamente para su estudio. Se utilizó la teoría de control para determinar cuál controlador mostraba un mejor efecto en el sobreimpulso y las oscilaciones del dedo biónico. El controlador de tipo proporcional más compensación presentó el mejor desempeño afectando menos el sobreimpulso y las oscilaciones en la señal de control, demostrando su viabilidad para ser utilizado en dispositivos biónicos para su posible incorporación en una prótesis de mano, destinada a ayudar a las personas amputadas a recuperar parte de sus capacidades disminuidas.

**PALABRAS CLAVE:** dedo biónico, control óptimo, control proporcional.

### ABSTRACT

Technological advances have enabled the development of devices to compensate for the loss of a limb; however, their current cost still makes them inaccessible for people with limited resources and, in many cases, even for those with moderate incomes. There is extensive development, both scientific and amateur, of bionic fingers, but it is common for control techniques to be overlooked in their manipulation. The objective of this study was to evaluate the performance of four types of closed-loop controllers in the stable operation of a bionic finger. The controllers used were proportional plus compensation, optimal proportional plus compensation, proportional-integral with pole placement, and proportional-integral with Ziegler-Nichols tuning, in a bionic finger specifically adapted for this study. Control theory was applied to determine which controller had a better effect on overshoot and oscillations in the bionic finger. The proportional plus compensation controller showed the best performance, with less impact on overshoot and control signal oscillations, demonstrating its viability for use in bionic devices and its potential incorporation into a hand prosthesis to help amputees regain part of their diminished capabilities.

**KEYWORDS:** bionic finger, optimal control, proportional control.

\*Correspondencia: [liliam\\_rodriguez@uaeh.edu.mx](mailto:liliam_rodriguez@uaeh.edu.mx)/Fecha de recepción: 15 de marzo de 2024/Fecha de aceptación: 25 de septiembre de 2024/Fecha de publicación: 4 de octubre de 2024.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Área académica de computación y electrónica, carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C. P. 42184. <sup>2</sup>Universidad Politécnica de Pachuca, Ingeniería Biomédica, Zempoala, Hidalgo, México, C. P. 43830.

## INTRODUCCIÓN

El vivir con una discapacidad, particularmente una amputación, limita considerablemente la ejecución de movimientos en la cotidianeidad y esta condición se agrava cuando no se tienen los recursos económicos para adquirir una prótesis biónica, ya que su costo puede alcanzar los 250 000 dólares, como es el caso del modelo Michelangelo de la empresa Ottobock (Ottobock, 2013). Existen opciones un poco más económicas, como el modelo Hero Arm de Open Bionics (Open Bionics, 2021) con un costo de 10 000 dólares. Otras empresas, con productos y precios similares, son The Winkley Company (Winkley, 1888), BioparrX (Bioparrx, 2018), P4H Bionics (P4HBionics, 2020).

En México, la Academia Nacional de Medicina reportó que se realizan alrededor de 75 amputaciones diarias, y que en 2014 la cantidad de personas con esta condición ascendía a 900 000, dato que contrasta con las 1 500 prótesis que son fabricadas al año por diversas instituciones, como el Instituto Nacional de Rehabilitación, el Instituto Mexicano del Seguro Social y el Sistema para el Desarrollo Integral de la Familia (Vazquez-Vela, 2016), lo que deja de manifiesto la necesidad de este tipo de dispositivos en el país.

La comunidad de software y hardware libre, conocida como el “movimiento maker” (Dougherty, 2012), ha desarrollado diversos proyectos de prótesis que pueden descargarse de la red e imprimirse en 3D. Aunque la mayoría de estos dispositivos son mecánicos, también existen aquellos que incorporan servomotores para realizar el movimiento de la mano. Sin embargo, es difícil encontrar información sobre cómo controlar estos dispositivos más allá del simple movimiento de los servomotores. Algunos ejemplos de estos proyectos se pueden ver en los trabajos de Burton (2016), Gross (2017), Open Bionics (2017) y Duran (2019); pero todos ellos carecen de sensores para determinar la posición de los dedos, lo que impide implementar un control en lazo cerrado.

La comunidad científica ha realizado diversas publicaciones al respecto, que abarcan desde el diseño mecánico hasta la incorporación de sensores y motores para realizar movimientos fluidos. Un ejemplo se puede observar en Kashef y col. (2020), quienes presentaron una comparación exhaustiva de diferentes diseños de dedos biónicos, entre los que destacan los modelos actuados por tendones (Jung y col., 2008), mecanismos de 4 barras simples (Jang y col., 2013) y compuestos (Yoon y Choi, 2017). Sin embargo, la mayoría de los modelos descritos se centran en el diseño del dedo y no en la forma de controlarlos.

En los diseños con mecanismos de 4 barras, se pueden considerar los trabajos de Li y col. (2017), Imbinto y col. (2018), Difonzo y col. (2020) y Machado y col. (2020) por mostrar dos grandes ventajas. La primera es la posibilidad de calcular los ángulos entre las falanges y, por lo tanto, la posición de la punta únicamente mediante el conocimiento del ángulo de la barra fija con respecto a un marco de referencia, lo que permite que el dedo completo sea actuado por un solo motor. La segunda hace referencia a la fuerza, ya que, como se explica en Imbinto y col. (2018), los dedos basados en mecanismos de cuatro barras son capaces de generar mayor fuerza de agarre que los actuados por tendones, además que estos últimos tienden a perder movilidad, debido al estiramiento constante del tendón.

En cuanto a la teoría de control, se observan una variedad de enfoques para modelar matemáticamente los dedos, siendo el más común el empleo de modelos cinemáticos y ecuaciones de Euler-Lagrange (Cortes, 2020), como puede apreciarse en Yoon y Choi (2017), Kordaczek y Pilat (2020), Rondinò y col. (2020) y Saharan y col. (2020).

La lista de proyectos con diseños para dedos biónicos es extensa; no obstante, la mayoría se centran únicamente en el diseño mecánico y en los movimientos que puede realizar, de-

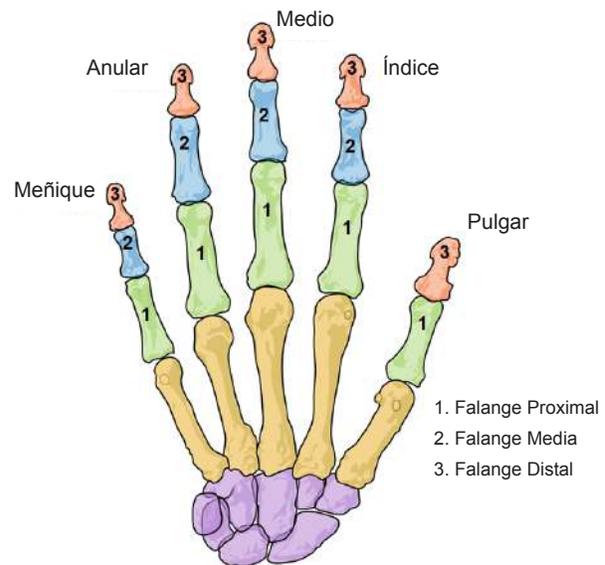
jando de lado la utilización de alguna técnica de control para manipular su posición. Existen algunos proyectos como Deshpande y col. (2013), donde se menciona un controlador proporcional integral derivativo (PID), mas no se hace referencia a la forma en que se sintoniza. En Liu y col. (2014) se indica que el diseño mostrado es controlado mediante un dispositivo basado en un procesador de señales digitales (DSP, por sus siglas en inglés: digital signal processor), aunque no se brinda más información sobre el mismo. Luo y col. (2014) presentaron un controlador de impedancia de modos deslizantes a nivel de simulación, teniendo como característica que los ángulos de las falanges se asumen conocidos y controlables, lo que complica su implementación en un modelo real. Deng y col. (2018) propuso el uso de un controlador PID difuso para determinar la fuerza de agarre de una mano protésica, siendo uno de los pocos que abordan el problema del control en este tipo de dispositivos. Con base en lo anterior, es posible establecer que aún se requieren más estudios para satisfacer la necesidad de aplicar teoría de control a una prótesis de mano.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño de cuatro controladores de lazo cerrado en el funcionamiento estable de un dedo biónico específicamente adaptado, con el fin de determinar cuál presenta el mejor control del sobreimpulso y las oscilaciones, para su posible implementación en dispositivos biónicos destinados a prótesis de mano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Identificación de falanges

Se utilizó como modelo de la mano humana la imagen propuesta por Velázquez-Velázquez y col. (2023) (Figura 1). La mano humana se conforma de 27 huesos (Sobinov y Bensmaia, 2021). En los dedos se encuentran 14 de ellos y son los que se consideraron para realizar el prototipo de prótesis. Se asignaron los nombres correspondientes a cada una de las 3 falanges que constituyen a los dedos índice, medio, anular y meñique y que son,



■ **Figura 1. Disposición de los huesos de la mano.**  
Figure 1. Arrangement of the bones of the hand.

a partir de la base, Falange Proximal (FP), Falange Media (FM) y Falange Distal (FD); el pulgar únicamente tiene dos, FP y FD.

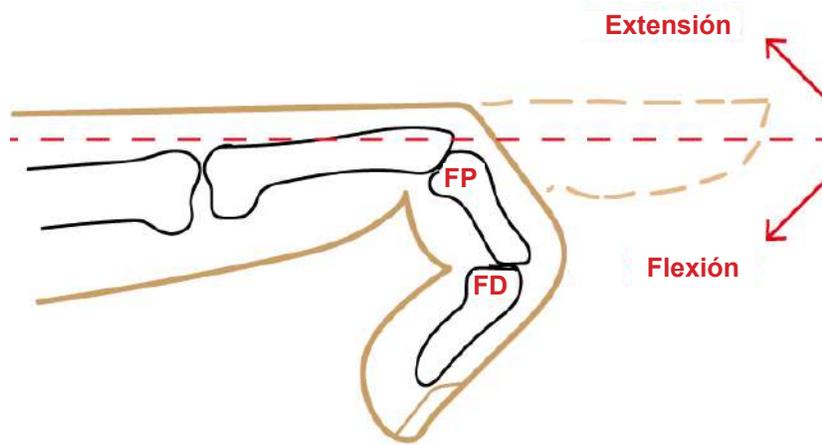
### Modelo de dedo

En el dedo desarrollado, se tomó como base el movimiento que se muestra en la Figura 2, mediante un mecanismo de cuatro barras (Lynch y Park, 2017), el cual es ampliamente utilizado en sistemas de brazos robóticos, por ejemplo, en Wahit y col. (2020) y Kim y col. (2021).

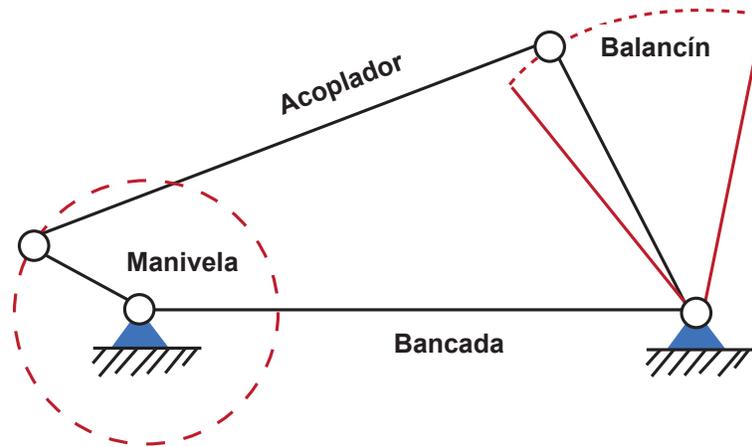
### Mecanismo de 4 barras

El mecanismo que presenta los movimientos de manivela y balancín, que permiten la movilidad del dedo, se muestra en la Figura 3. Para comprender más a fondo su utilidad, se definen los siguientes conceptos:

- **Bancada:** eslabón que se encuentra fijo al marco de referencia.
- **Manivela:** barra que puede realizar una revolución completa y que se encuentra anclada a la bancada.
- **Balancín:** eslabón que presenta movimiento oscilatorio, también llamada de vaivén y que se encuentra ligado a la bancada.
- **Acoplador:** barra con movimiento completo y no se encuentra enlazada a la bancada.



■ Figura 2. Movimiento de flexión y extensión de un dedo.  
Figure 2. Flexion and extension movement of a finger.



■ Figura 3. Movimientos de un mecanismo de cuatro barras.  
Figure 3. Movements of a four-bar mechanism.

Una ventaja que presentan estos mecanismos es la posibilidad de saber los movimientos que podrán realizar conociendo únicamente las longitudes de cada barra; al respecto, se presenta el siguiente teorema, conocido como “Ley de Grashof”:

**Teorema 1** (Grashof, 1883). Un mecanismo de cuatro barras, tiene al menos un movimiento de manivela si el Criterio de Grashof se cumple y presentará un doble balancín si (1) no se satisface:

$$s + l \leq p + q \quad (1)$$

Donde:

$s$  = eslabón de menor longitud

$l$  = eslabón de mayor longitud

$p$  y  $q$  = eslabones de longitud intermedia (no necesariamente iguales)

El movimiento requerido para el dedo fue el de balancín (Figuras 2 y 3), por lo que se establecieron las siguientes medidas para cada uno de los eslabones:

$$s = 7.071 \text{ mm}$$

$$l = 37 \text{ mm}$$

$$p = 10 \text{ mm}$$

$$q = 25.015 \text{ mm}$$

Esto permitió no satisfacer el criterio de Grashof (1), ya que no fue mayor:

$$7.071 \text{ mm} + 37 \text{ mm} \leq 10 \text{ mm} + 25.015 \text{ mm}$$

$$44.071 \leq 35.015$$

lo que, de acuerdo con el Teorema 1, implicó que el mecanismo propuesto tuviese el movimiento de balancín deseado.

### Diseño 3D del dedo

Se realizó utilizando el programa para modelado en 3D Fusion 360 de Autodesk en su versión 2022, y posteriormente impreso en 3D empleando ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés: polylactic acid). Su estructura y forma se observan en la Figura 4.

### Parámetros de comparación

Debido a que no se encontraron artículos en los que se realicen comparaciones sobre el desempeño de controladores en dedos biónicos, para poder determinar qué controlador es el ideal para este tipo de dispositivos se establecen las siguientes condiciones:

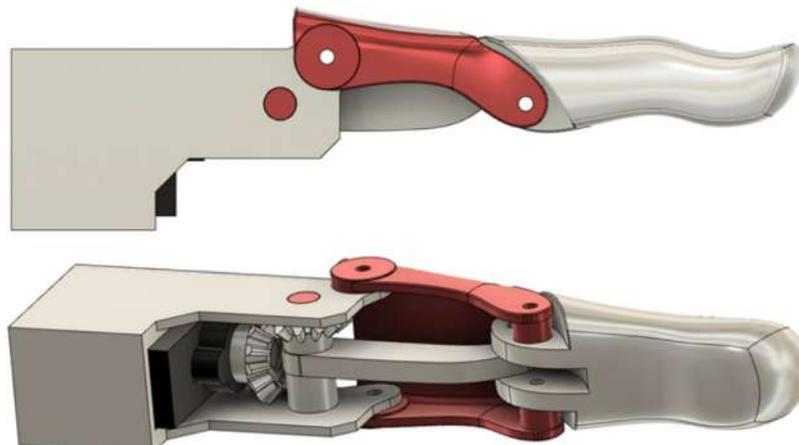
a. El estado/sobreimpulso, fenómeno en el cual la respuesta de un sistema dinámico excede su valor final deseado antes de estabilizarse (Nise, 2020), debe ser mínimo, ya que las oscilaciones excesivas, en el movimiento

del dedo, pueden llevar a un agarre ineficiente de objetos. Un nivel adecuado de oscilaciones se determina por la capacidad del dedo para mantener un agarre estable y seguro. Minimizar estas oscilaciones es crucial para asegurar un control preciso y una sujeción firme.

b. Las oscilaciones en la señal de control, que son variaciones repetitivas e indeseadas en la salida del controlador, deben ser mínimas. Estas oscilaciones se manifiestan como vibraciones en el servomotor, lo que no solo afecta la estabilidad y precisión del dispositivo, sino que también, con el tiempo, puede causar un desgaste prematuro en los componentes mecánicos del mismo.

Se evaluó la eficiencia de cada controlador determinando el índice de desempeño de Error Integral Absoluto (IAE, por sus siglas en inglés: integral absolute error,) para ambas condiciones establecidas: a) el estado (sobreimpulso) y b) señal de control (oscilaciones en el controlador). En ambos casos se considera que, entre menor sea el valor calculado de este índice, mejor será el comportamiento del controlador. De acuerdo con Nise (2020), el IAE se define como:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$



■ Figura 4. Modelo 3D del dedo biónico. Vistas lateral e inferior.

Figure 4. 3D model of the bionic finger. Side and bottom views.

donde  $e(t)$  es la diferencia entre el valor obtenido y el esperado. El valor resultante de IAE determina la magnitud general del error para cada condición.

Para calcular el índice IAE en el caso del sobreimpulso, el error se determinó como la diferencia entre la posición esperada y la posición real del dedo. En el caso de las oscilaciones, el error se determinó como la diferencia entre la señal de control esperada y la señal de control real enviada al servomotor.

### Modelo matemático

El estado del sistema, conjunto mínimo de variables que describen completamente la condición de un sistema en cualquier instante de tiempo (Nise, 2020), es la posición del dedo, la cual se infiere a partir de la posición del servomotor que se encuentra conectado al mecanismo mediante un juego de engranes (como puede apreciarse en la Figura 4). Debido a que el estado debe estar disponible en cada instante de tiempo, el servomotor se modificó para poder leer su posición en todo momento mediante un alambre conectado al potenciómetro interno. Para simplificar la adquisición de datos se establece una relación lineal entre ambas posiciones (servomotor y dedo), considerando que el servomotor se encuentra en el rango  $[0^\circ \text{ a } 180^\circ]$  y el dedo en  $[0^\circ \text{ a } 70^\circ]$ .

Debido a que el actuador es un servomotor, es necesario generar una señal Modulada por Ancho de Pulso (PWM, por sus siglas en inglés: Pulse Width Modulation) para controlarlo, la cual se encuentra en el rango de operación  $[500 \mu\text{s} \text{ a } 2\ 500 \mu\text{s}]$ , sin embargo, manipular el servomotor directamente con estos valores genera demasiada vibración, por lo que se propone una conversión lineal hacia el rango  $[0 \text{ a } 800]$  unidades, siendo esta la señal de control que se utiliza en las pruebas posteriores.

Para realizar la adquisición de datos se utilizó el microcontrolador ESP32, modelo ESP32-WROOM-32D, de la marca Espressif Systems

(Shanghai, China) y cuya hoja de especificaciones técnicas se puede consultar en Espressif(2022).

La medición del comportamiento de cada uno de los controladores descritos, tanto en simulación como directo en el dedo (real), se realizó de acuerdo al seguimiento de una trayectoria predefinida  $r(t)$ , la cual consistió en un ciclo de movimiento de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , manteniéndose en  $180^\circ$  brevemente antes de retornar a  $0^\circ$ , repitiendo este ciclo tres veces con una duración aproximada de 10 s por ciclo, resultando en un experimento total de 30 s. Cada prueba se realizó 10 veces para cada controlador.

### Algoritmo de Mínimos Cuadrados Ordinarios para la identificación de los parámetros del sistema

Se utilizó el algoritmo de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) para obtener el modelo matemático de una planta (Wellstead y Zarrop, 1991), el cual es un proceso de regresión lineal que consiste en obtener la línea que aproxima mejor un conjunto de datos; es adecuado cuando únicamente se tiene acceso a los valores de entrada y de salida de un proceso. No siempre es posible obtener una aproximación efectiva mediante una única línea (ya que en la realidad, la mayoría de los procesos no son completamente lineales), sin embargo, el algoritmo de MCO puede realizar generalizaciones importantes, lo que permite que, en lugar de obtener una única línea, se obtenga la mejor aproximación dada por cualquier cantidad finita de combinaciones lineales de diversas funciones.

El algoritmo de MCO resuelve el problema de encontrar los coeficientes:

$$a_1, a_2, \dots, a_n,$$

dadas las funciones:

$$f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x),$$

de forma tal que, la combinación lineal propuesta:

$$y = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x) + \dots + a_n f_n(x)$$

es la mejor aproximación a los datos (Farebrother, 2018).

Siguiendo el algoritmo de MCO, lo primero es proponer las funciones cuyos coeficientes se pretende encontrar y no existe ninguna regla sobre el número y la forma que deben tener dichas funciones, por lo que es posible partir de un conjunto básico e ir incrementándolo de forma heurística hasta obtener el resultado esperado. Debido a que el sistema que se pretende aproximar es la posición de un motor, se propuso el modelo:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -ax(t) + but(t) \\ y(t) &= x(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

$x(t)$  = la posición del motor (estado)

$a$  y  $b$  = parámetros a estimar

$u(t)$  = la entrada (control)

$y(t)$  = la salida del sistema.

De acuerdo con el método propuesto en Wellstead y Zarrop (1991), discretizando mediante el método de Euler hacia adelante se tiene:

$$\frac{y[k+1] - y[k]}{T} = -ay[k] - bu[k]$$

$$y[k+1] = (-aT + 1)y[k] + bTu[k]$$

$$y[k] = (-aT + 1)y[k-1] + bTu[k-1]$$

$$\text{sea } \alpha = -aT + 1 \text{ y } \beta = bT, \text{ entonces}$$

$$y[k] = \alpha y[k-1] + \beta u[k-1]$$

De acuerdo con el algoritmo de MCO, el sistema se puede representar como:

$$y[k] = X^T[k]\theta + e[k]$$

con el vector de regresión con variables medidas  $X^T[k] = [y[k-1], u[k-1]]$  y el vector de parámetros

desconocidos  $\theta = \begin{bmatrix} a \\ \beta \end{bmatrix}$ , por lo que el vector de estimación de parámetros MCO es:

$$\hat{\theta}[k] = (X^T[k]X[k])^{-1}(X^T[k]y[k])$$

Finalmente, los parámetros originales de la ecuación propuesta son:

$$a = \frac{-\alpha + 1}{T} \quad y \quad b = \frac{\beta}{T}$$

Considerando un tiempo de muestreo  $T = 20$  ms, se obtuvieron los valores de entrada y salida de la planta y se realizó el cálculo de parámetros, obteniendo  $a = 17.3573$  y  $b = 4.2357$ .

La Figura 5 muestra los valores de entrada introducidos a la planta (gráfico de arriba), la validación del modelo, con los valores de salida tanto reales como simulados y la referencia deseada (gráfico de en medio) y el error entre la referencia deseada y la salida real (gráfico de abajo). Se puede observar que los valores del modelo matemático se aproximan correctamente a los de la planta, por lo que se considera que los parámetros calculados son válidos para los experimentos posteriores.

## Controladores

Se eligieron cuatro leyes de control para probar el dedo biónico, con base a su compatibilidad con el diseño de la planta y su facilidad de implementación, lo que permitió evaluar su desempeño de manera clara y eficiente, facilitando la comparación de resultados.

### Control proporcional más compensación

Se considera un control realimentado para el sistema (2) de la forma  $u(t) = K_p e(t) + u_b$  (Astrom y Hägglund, 2006). Definiendo el error como  $e(t) = y(t) - X_d$ , se obtiene:

$$u_b = \frac{a}{b} X_d$$

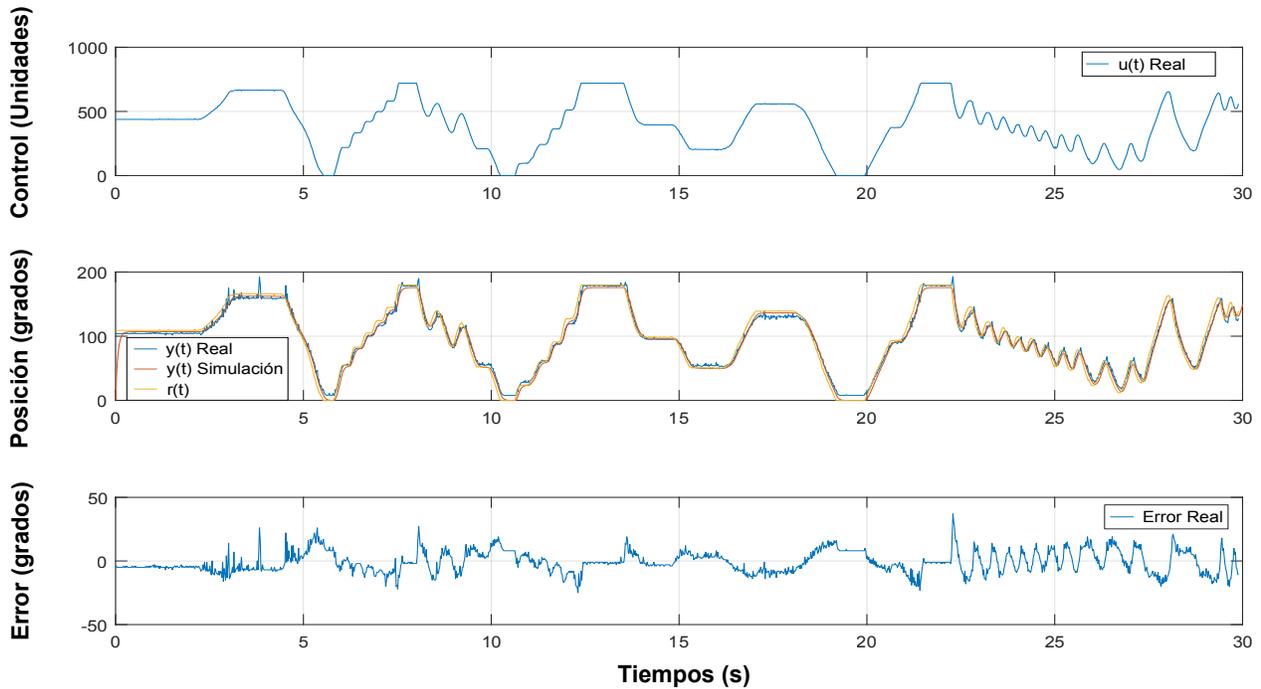
Donde

$X_d$  = referencia deseada

$e(t)$  = error entre la salida y la referencia

$K_p$  = ganancia proporcional del controlador

$u_b$  = valor de compensación



■ Figura 5. Gráficas de resultados del modelo matemático con los parámetros calculados con Mínimos Cuadrados Ordinarios.

Figure 5. Graphs of results from the mathematical model with parameters calculated using Ordinary Least Squares.

Estableciendo el polo del sistema deseado en  $-28$  se obtiene una ganancia  $K_p = -2.5126$  y una compensación  $u_b = 4.0979X_d$ .

### Control proporcional óptimo más compensación

La técnica del Regulador Lineal Cuadrático (LQR, por sus siglas en inglés: Linear Quadratic Regulator), tiene como objetivo minimizar el índice de desempeño (Lewis y col., 2012) para el sistema (2):

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt$$

Donde:  $Q$  y  $R$  son valores de penalización propuestos que condicionan el desempeño del estado  $x(t)$  y la señal de control  $u(t)$ , respectivamente.

De acuerdo con el trabajo presentado en Lewis y col. (2012) se sabe que, la señal de control que cumple el objetivo de LQR es  $u(t) =$

$Kx(T)$ , donde  $K = -R^{-1}B^T P$  es la ganancia proporcional y  $P$  es la solución de la ecuación de Ricatti  $A^T P + PA - PBR^{-1}BT + Q = 0$ .

Es importante recordar que el sistema (2) es escalar, por lo que las matrices  $A$  y  $B$  son en realidad los coeficientes  $a$  y  $b$  obtenidos previamente mediante MCO.

Para obtener la  $K$ , se proponen los valores  $Q = 3$  y  $R = 10$  y mediante el comando "lqr" del programa MatLab R2017b se obtiene que  $K = 8.2322$ . Para el valor de compensación se utiliza el calculado en el Método 2.

### Control proporcional integral por asignación de polos

Para el sistema (2), la ecuación característica con un control Proporcional Óptimo (Astrom y Hägglund, 2006) es:

$$P_c(s) = s^2 + (a + k_p b)s + \frac{k_p}{t_i} b$$

Se propone la ecuación deseada  $P_d(s) = s^2 + 33s + 130$ , igualando los coeficientes de ambas ecuaciones se obtienen los valores de las ganancias:

$$a + k_p b = 33$$

$$k_p = \frac{33 - a}{b}$$

$$k_p = 3.693 \text{ 1}$$

$$\frac{k_p}{t_i} b = 130$$

$$t_i = \frac{k_p b}{130}$$

$$t_i = 0.120 \text{ 3}$$

### Controlador proporcional integral por Ziegler-Nichols

Para el sistema (2), el método de sintonización Ziegler-Nichols (Astrom y Hägglund, 2006) establece las ecuaciones:

$$k_p = 0.9 \frac{T}{KL}$$

$$T_i = \frac{L}{0.3}$$

Donde:

$$K = \frac{a}{b}$$

$$T = \frac{1}{a}$$

Este método considera un sistema con retardo, por lo que se propone  $L = 0.01$ . Realizando las operaciones indicadas, se obtienen los valores de las ganancias del controlador  $K_p = 21.245 \text{ 9}$  y  $t_i = 0.033 \text{ 3}$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

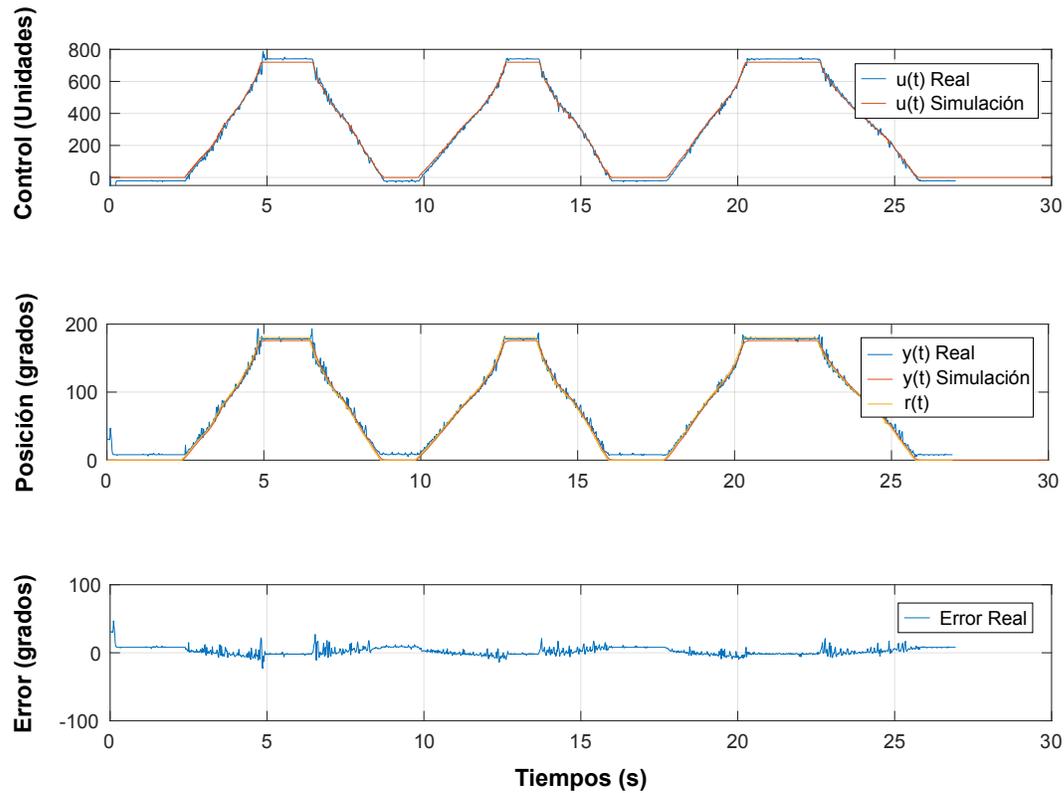
Las Figuras 6 a 9, muestran el mismo conjunto de información correspondiente a cada uno de los controladores considerados en uno de los experimentos realizados. Para todos los casos se puede ver, en la gráfica de arriba, la señal de control  $u(t)$  (real y simulada), mientras que en la de en medio se

observa la posición del dedo  $y(t)$  (real y simulada) y la forma en la que se ajustan a la referencia predeterminada  $r(t)$ . Por último, en la gráfica de abajo, se muestra el error entre la posición real del dedo y la referencia.

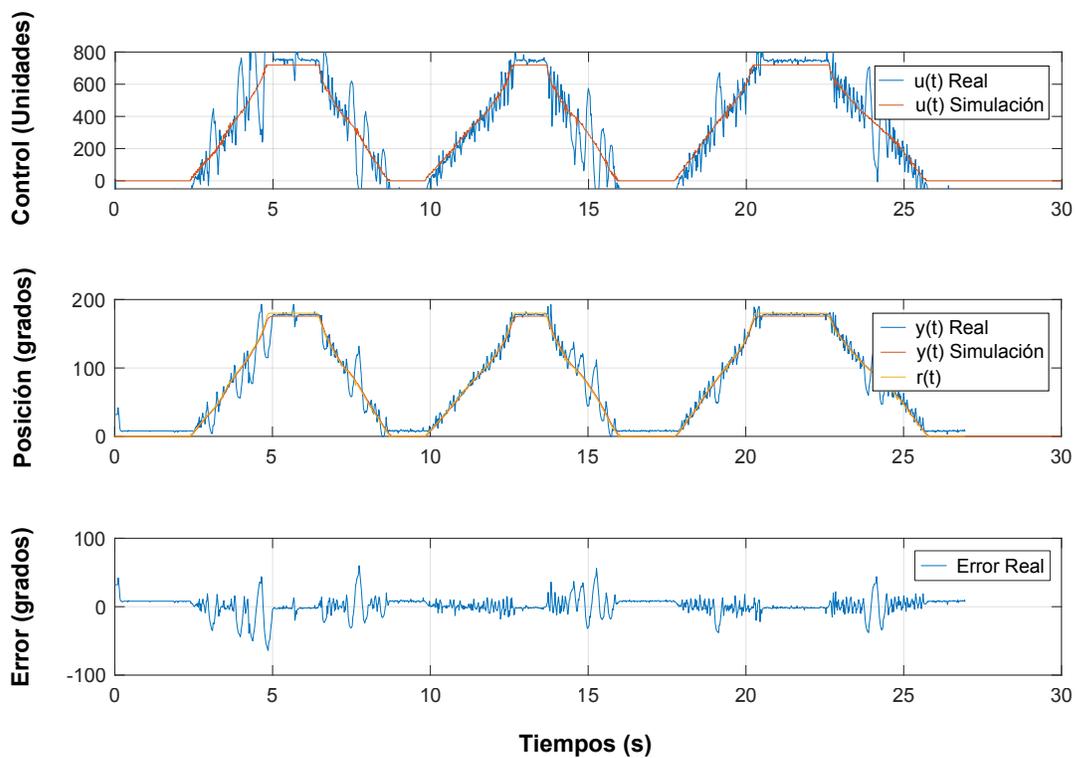
El sobre impulso en el dedo (Tabla 1), determinado por la integral del valor absoluto del error, es aproximadamente el mismo para todos los controladores; no obstante, las diferencias se vuelven más evidentes en las oscilaciones de la señal de control. En este aspecto, el control proporcional más compensación es el que presenta menos oscilaciones, lo que implica un menor impacto en el actuador. Por lo tanto, este controlador, en conjunto, muestra el mejor desempeño de los cuatro evaluados, ya que presenta los valores más bajos en ambos índices de desempeño. Dado que el coeficiente de variación es pequeño, se considera que los resultados obtenidos son estadísticamente representativos.

El desempeño de cuatro controladores de realimentación de estado en un dedo biónico no ha sido abordado en la literatura científica actual. Aunque existen investigaciones sobre el control de dedos biónicos, estas se han centrado en controladores específicos como el PD (Prakash y Sharma, 2020), Impedancia por modos deslizantes (Luo y col., 2014) e incluso on-off (Tchimino y col., 2021), todos con la intención de mejorar el agarre de una mano biónica, pero sin realizar una comparación entre diferentes controladores. Aún, cuando hay una amplia variedad de controladores documentados en la literatura, para esta primera comparativa en un dedo biónico se eligieron cuatro de los más comunes. Estos controladores fueron seleccionados porque han demostrado ser eficaces en una variedad de aplicaciones y se consideran opciones versátiles en el ámbito del control de sistemas (Franklin y col., 2019).

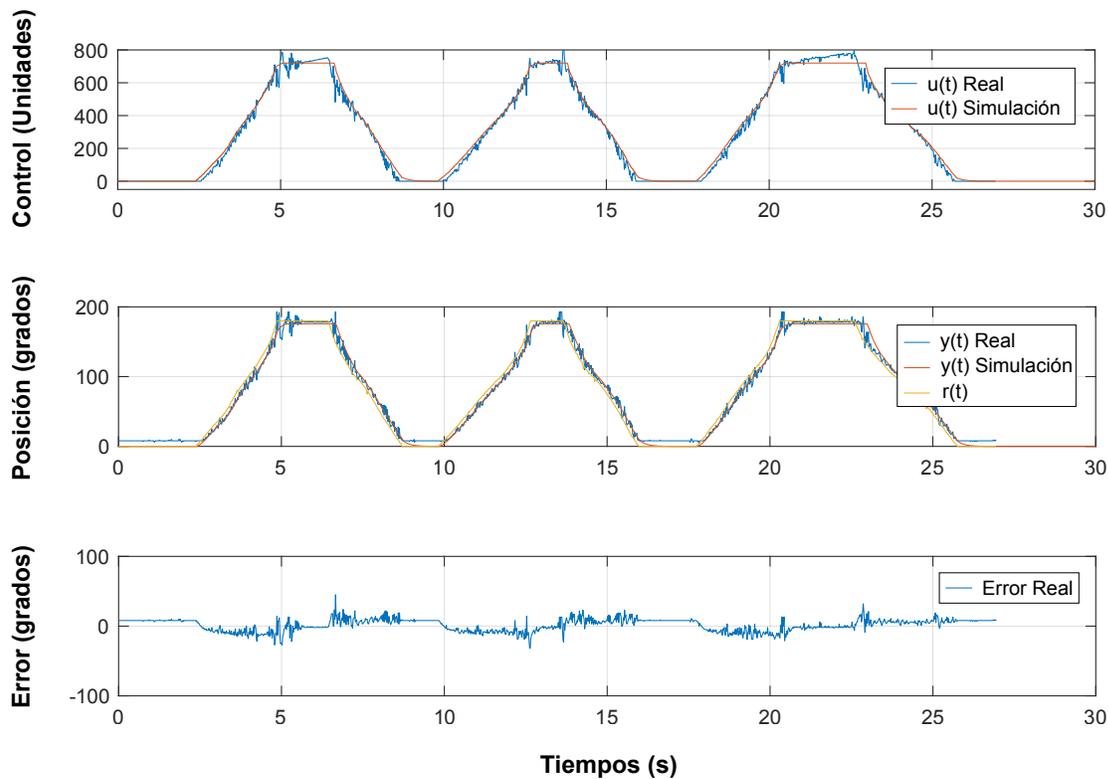
El hecho de que el controlador, en apariencia, más simple de todos, sea el que presenta los mejores resultados, genera una nueva serie de preguntas que, como trabajo futuro se



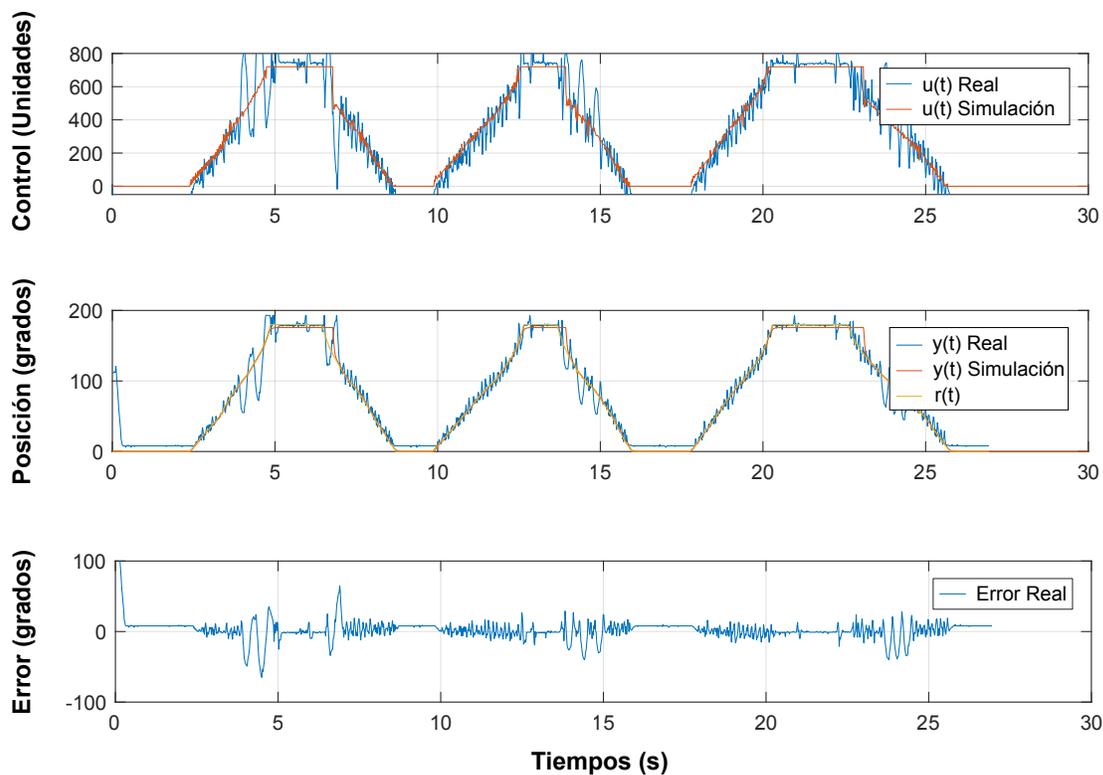
■ Figura 6. Gráficas de resultados para Controlador Proporcional con compensación.  
 Figure 6. Results graphs for Proportional Controller with bias.



■ Figura 7. Gráficas de resultados para Controlador Proporcional Óptimo con compensación.  
 Figure 7. Results graphs for Optimal Proportional Controller with bias.



■ Figura 8. Gráficas de resultado para Controlador Proporcional Integral por Asignación de Polos.  
Figure 8. Result graphs for Proportional Integral Controller by Pole Assignment.



■ Figura 9. Gráficas de resultados para Controlador Proporcional Integral por Ziegler-Nichols.  
Figure 9. Results graphs for Proportional Integral Controller by Ziegler-Nichols.

■ Tabla 1. Media, desviación estándar y coeficiente de variación de los índices de desempeño para cada controlador. Proporcional más compensación (P + Comp.), Proporcional óptimo más compensación (PO + Comp.), Proporcional Integral por asignación de polos (PI Polos) y Proporcional Integral por Ziegler-Nichols (PI ZN).

Table 1. Mean, standard deviation, and coefficient of variation of the performance indices for each controller. Proportional plus compensation (P + Comp.), Optimal Proportional plus compensation (OP + Comp.), Proportional-Integral with pole placement (PI Poles), and Proportional-Integral with Ziegler-Nichols tuning (PI ZN).

Controlador	Integral Valor Absoluto del Error			Integral Valor Absoluto del Control		
	Media	Desviación Estándar	Coefficiente Variación	Media	Desviación Estándar	Coefficiente Variación
P + Comp.	142.5	7.75	5.44 %	854.8	25.33	2.96 %
PO + Comp.	265	7.35	2.77 %	1992	56.91	2.86 %
PI Polos	239.2	11.28	4.71 %	1582.2	59.72	3.76 %
PI ZN	253.4	8.66	3.42 %	1782	24.78	1.39 %

pretenden responder, algunas de las cuales son, ¿el rendimiento se mantendrá cuando se analice una mano con todos los dedos funcionando en paralelo?, ¿cómo se comportará la mano ante perturbaciones externas?, ¿cuál será el consumo de energía de cada controlador, de cara a considerar que este dispositivo debe operar con baterías?, entre otras; sin embargo, lo que si puede afirmarse es que es este tipo de comparaciones son indispensables con miras a generar dispositivos que puedan competir con los que existen actualmente en el mercado, basado en dispositivos biónicos que utilizan controles en lazo abierto y operan mediante señales mioeléctricas (SEMG) (Song y col., 2023), no solo en costo, sino también en funcionamiento.

## CONCLUSIONES

El controlador proporcional más compensación fue el que mejor desempeño presentó en las pruebas realizadas al mostrar una menor incidencia de sobre impulso y oscilaciones en la señal de control en comparación con los otros evaluados, lo que lo convierte en la opción más adecuada para el funcionamiento estable de un dedo biónico. Estos resultados sugieren que el controlador proporcional más compensación es una alterna-

tiva viable para su implementación en dispositivos biónicos, especialmente en prótesis de mano, debido a su precisión y capacidad para minimizar el desgaste del actuador. La tendencia actual en dispositivos biónicos del control en lazo abierto mediante SEMG abre la posibilidad de integrar señales EMG como referencia para un controlador en lazo cerrado, permitiendo un control más intuitivo y adaptativo del movimiento del dedo biónico hacia la posición deseada. La combinación de controladores de lazo cerrado con señales EMG podría aumentar la funcionalidad y precisión de las prótesis. Finalmente, los resultados obtenidos no solo proporcionan un sólido punto de partida para futuras comparaciones de controladores, sino que también destacan el potencial de seguir investigando en la integración del control por señales mioeléctricas. La investigación futura podría centrarse en optimizar esta combinación de controladores para mejorar aún más la capacidad de las prótesis biónicas y aumentar la calidad de vida de las personas con amputaciones de miembros superiores.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

## REFERENCIAS

- Astrom, K. J. & Häggglund, T. (2006). PID control. *IEEE Control Systems Magazine*.
- Bioparx (2018). Bioparx. [En línea]. Disponible en: <http://www.bioparx.com/>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2022.
- Burton, D. (2016). Robotic or prosthetic hand. [En línea]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:1830958>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2022.
- Cortes, F. R. (2020). Robótica: control de robots manipuladores. Marcombo.
- Deng, H., Luo, H., Wang, R., & Zhang, Y. (2018). Grasping force planning and control for tendon-driven anthropomorphic prosthetic hands. *Journal of Bionic Engineering*, 15(5), 795-804. <https://doi.org/10.1007/s42235-018-0067-z>
- Deshpande, A. D., Ko, J., Fox, D., & Matsuoka, Y. (2013). Control strategies for the index finger of a tendon-driven hand. *The International Journal of Robotics Research*, 32(1), 115-128. <https://doi.org/10.1177/0278364912466925>
- Difonzo, E., Zappatore, G., Mantriota, G., & Reina, G. (2020). Advances in finger and partial hand prosthetic mechanisms. *Robotics*, 9(4), 80. <https://doi.org/10.3390/robotics9040080>
- Dougherty, D. (2012). The maker movement. *Innovations: Technology, Governance, Globalization*, (3), 11-14. <https://muse.jhu.edu/article/499244>
- Duran, L. (2019). Prototype for the "LAD" Robotic Hand-finger. [En línea]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:3742369>. Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2022.
- Espressif (2022). Espressif Systems. [En línea]. Disponible en: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf). Fecha de consulta: 17 de agosto de 2022.
- Farebrother, R. W. (2018). Linear least squares computations. Routledge.
- Franklin, G. F., Powell, D., & Emami-Naeini, A. F. (2019). Feedback Control of Dynamic Systems. Pearson.
- Grashof, F. (1883). Theoretische Maschinenlehre. Leipzig.
- Gross, R. (2017). Humanoid robotic hand. [En línea]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:2269115>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2022.
- Imbinto, I., Montagnani, F., Bacchereti, M., Cipriani, C., Davalli, A., Sacchetti, R., Gruppioni, E., Castellano, S., & Controzzi, M. (2018). The S-Finger: a synergetic externally powered digit with tactile sensing and feedback. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(6), 1264-1271. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2829183>
- Jang, G., Lee, C., Lee, H., & Choi, Y. (2013). Robotic index finger prosthesis using stackable double 4-BAR mechanisms. *Mechatronics*, 23(3), 318-325. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.01.006>
- Jung, S. Y., Kang, S. K., & Moon, I. (2008). Design of biomimetic hand prosthesis with tendon-driven five fingers. *IEEE*.
- Kashef, S. R., Amini, S., & Akbarzadeh, A. (2020). Robotic hand: A review on linkage-driven finger mechanisms of prosthetic hands and evaluation of the performance criteria. *Mechanism and Machine Theory*, 145, 103677. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103677>
- Kim, U., Jung, D., Jeong, H., Park, J., Jung, H. M., Cheong, J., Choi, H. R., Do, H., & Park, C. (2021). Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand. *Nature Communications*, 12(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27261-0>
- Kordaczek, R. & Pilat, A. K. (2020). Prototype and Simulation Model of a Robotic Hand. *International Conference Mechatronic Systems and Materials*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/MSM49833.2020.9201741>
- Lewis, F. L., Vrabie, D., & Syrmos, V. L. (2012). Optimal Control. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118122631>
- Li, X., Huang, Q., Chen, X., Yu, Z., Zhu, J., & Han, J. (2017). A novel under-actuated bionic hand and its grasping stability analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(2), 1687814016688859. <https://doi.org/10.1177/1687814016688859>
- Liu, Y. W., Feng, F., & Gao, Y. F. (2014). HIT prosthetic hand based on tendon-driven mechanism. *Journal of Central South University*, 21(5), 1778-1791. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2124-z>
- Luo, H., Duan, X., & Deng, H. (2014). Sliding mode impedance control of a underactuated prosthetic hand. *IEEE, 2014. IEEE International conference on information and automation*. <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2014.6932747>
- Lynch y Park. (2017). Modern robotics. Cambridge University Press.
- Machado, B., Quintero, E., Safla, E., & Armijos,

A. (2020). Síntesis dimensional de mecanismo para una mano robótica basado en un eslabonamiento de cuatro barras. *Polo del Conocimiento: Revista Científico-profesional*, 5(12), 707-724.

Nise, N. S. (2020). *Control systems engineering*. John Wiley & Sons.

Open Bionics (2017). *Ada Robotic Hand*. [En línea]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:1294517>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2022.

Open Bionics (2021). *Open bionics*. [En línea]. Disponible en: <https://openbionics.com>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2022.

Ottobock (2013). *Prótesis de Miembro Superior*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ottobock.com.mx/prosthetics/upper-limb/>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2022.

P4HBionics (2020). *P4H Bionics*. [En línea]. Disponible en: <https://p4hbionics.com>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2022.

Prakash, A. & Sharma, S. (2020). A low-cost system to control prehension force of a custom-made myoelectric hand prosthesis. *Research on Biomedical Engineering*, 36, 237-247.

Rondinò, S., Pisla, D., & Carbone, G. (2020). Design, simulation and preliminary testing of a robotic hand with a one-DOF movable palm. <https://doi.org/10.1109/AQTR49680.2020.9129962>

Saharan, L., Wu, L., & Tadesse, Y. (2020). Modeling and simulation of robotic finger powered by nylon artificial muscles. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 12(1), 014501. <https://doi.org/10.1115/1.4044740>

Sobinov, A. R. & Bensmaia, S. J. (2021). The neural mechanisms of manual dexterity. *Nature Reviews neuroscience*, 22(12), 741-757. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00528-7>

Song, T., Yan, Z., Guo, S., Li, Y., Li, X., & Xi, F. (2023). Review of sEMG for robot control: Techniques and applications. *Applied Sciences*, 13(17), 9546.

Tchimino, J., Markovic, M., Dideriksen, J. L., & Dosen, S. (2021). The effect of calibration parameters on the control of a myoelectric hand prosthesis using EMG feedback. *Journal of Neural Engineering*, 18(4), 046091. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac07be>

Vazquez-Vela, E. (2016). *Los amputados y su rehabilitación. Un reto para el Estado*. Academia Nacional de Medicina.

Velázquez-Velázquez, E., Doroteo-Chimal, C., Diaz-Arizmendi, L. J. y Suárez-Benítez, M. C. (2023). Estadíos de maduración ósea digitopalmar en pacientes de la Clínica de Ortodoncia de la Universidad de Ixtlahuaca en comparación a los criterios establecidos por Björk, Grave y Brown, agosto 2016-julio 2018. *Revista mexicana de ortodoncia*, 8(4), 236-244.

Wahit, M. A., Ahmad, S. A., Marhaban, M. H., Wada, C., & Izhar, L. I. (2020). 3D printed robot hand structure using four-bar linkage mechanism for prosthetic application. *Sensors*, 20(15), 4174. <https://doi.org/10.3390/s20154174>

Wellstead, P. E. E. & Zarrop, M. B. (1991). *Self-tuning Systems: Control and Signal Processing*. West Sussex: John Wiley & Sons.

Winkley (1888). *The winkley company*. [En línea]. Disponible en: <https://www.winkley.com>. Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2022.

Yoon, C. y Choi, D. (2017). Underactuated finger mechanism using contractible slider-crank and stackable four-bar linkages. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(5), 2046-2057. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2723718>

Los autores deben solicitar al correo electrónico [cienciauat@uat.edu.mx](mailto:cienciauat@uat.edu.mx) un usuario y contraseña para que sean registrados en la plataforma de la revista.

En su solicitud para postular un manuscrito deberán incluir título del mismo, su resumen y un correo oficial de una institución académica o centro de investigación (públicos o privados). No se recibirán manuscritos por otra vía, impresa o electrónica.

Es necesario revisar las políticas editoriales y las normas de publicación antes de enviar una contribución.

## Directrices para autor/es/as

### 1.1. Contribuciones

Se reciben artículos y revisiones de literatura actualizadas en español, enfocados principalmente a temáticas de Iberoamérica, en las siguientes áreas del conocimiento:

- Física, matemáticas y ciencias de la tierra
- Biología y química
- Medicina y ciencias de la salud
- Humanidades y ciencias de la conducta
- Ciencias sociales
- Biotecnología y ciencias agropecuarias
- Ingenierías

### 1.2. Consideraciones generales

El material debe ser original e inédito y no estar considerado para publicarse simultáneamente en otras revistas u órganos editoriales. Los manuscritos deberán tener calidad científica y utilizar un lenguaje claro y preciso, definiendo los términos técnicos, para permitir su comprensión por lectores de otros campos y con diferentes niveles académicos. Es importante considerar que la revista es multidisciplinaria por lo que el perfil de los lectores es muy amplio.

Las siguientes secciones deben estar en español e inglés: título, resumen, palabras clave, títulos de tablas y figuras. Las figuras (imágenes, gráficos, mapas geográficos, mapas conceptuales, entre otros) además de su inserción al final del texto, deberán enviarse en archivos separados en formato jpg, a 300 dpi o superior (consultar especificaciones de figuras) y adjuntarse el archivo editable.

El texto deberá apegarse a la guía del sistema de unidades internacional.

El autor es responsable de la correcta redacción en cada sección del manuscrito.

### 1.3. Autores

El número de autores del manuscrito debe ser congruente con la calidad y cantidad de trabajo realizado y presentado. Un exceso de autores no justificable es causa de rechazo del mismo.

El manuscrito debe incluir la ficha autoral en una hoja por separado que indique: el nombre completo de los autores (evitando uso de iniciales; los apellidos paterno y materno serán enlazados con un guion corto).

La institución de adscripción del autor de correspondencia será en el siguiente orden: adscripción institucional (pública o privada), facultad, instituto o centro de investigación, área o departamento; dirección postal (incluir calle, número, colonia, ciudad, estado, país, código postal) y correo electrónico para correspondencia.

También deberá agregar adicionalmente un teléfono con lada (para comunicación editorial exclusivamente).

Los datos de los demás autores seguirán el siguiente orden: adscripción institucional (pública o privada); facultad, instituto o centro de investigación, ciudad, estado y país.

Para todos los autores se debe incluir número de CVU Conahcyt, ORCID iD y nivel SNII en caso de tener.

## Proceso de evaluación y seguimiento

La clave de usuario y contraseña le permitirán al autor de correspondencia ingresar y subir a la plataforma su manuscrito, así como continuar el proceso editorial, revisando el estatus del mismo, una vez cumplidos los requisitos de formato y haberle asignado un editor.

El proceso editorial se desarrolla en cuatro etapas:

Revisión de formato.

Revisión por parte del editor de área.

Revisión por pares.

Diseño y adecuación editorial.

Los autores deberán atender todas las observaciones y sugerencias que se le indiquen durante las revisiones que reciba el manuscrito en cada una de las cuatro etapas, marcando en color rojo los cambios realizados al último manuscrito (es necesario que se trabaje en el mismo word que se le haga llegar en cada ocasión).

En la etapa de formato, los manuscritos se someten a una evaluación preliminar por parte del departamento editorial de la revista, para verificar que cumplan con los requisitos establecidos, y analizar el nivel de similitud con material previamente publicado (a través del software iThenticate). Una vez que se cumpla con las consideraciones generales de publicación, se asignará el trabajo al editor de área. Los trabajos que no concluyan esta etapa en un máximo de 30 días serán dados de baja.

En la segunda etapa, el editor de área revisará la pertinencia de los manuscritos para establecer si el trabajo se envía a evaluación o se da de baja. Es posible que el editor realice recomendaciones a los autores y sujete el manuscrito a una segunda revisión ante de emitir su decisión final. Los autores tienen 10 días para regresar su manuscrito con los cambios solicitados.

A partir de esta etapa, los autores además de dar respuesta a cada una de las observaciones, señalando en color rojo las modificaciones realizadas al último manuscrito, deberán anexar un listado con las respuestas a cada una de las observaciones y las modificaciones desarrolladas, indicando los números de línea donde se localizan.

Los manuscritos aprobados por editor de área serán enviados a evaluar por al menos dos pares académicos externos, expertos en el tema de interés, quienes determinarán la aceptación o rechazo del artículo, decisión basada en el análisis académico y científico del material. En caso de discrepancia en los resultados de los evaluadores, el escrito se enviará a un tercer árbitro, cuya decisión definirá la aceptación o rechazo.

Los autores recibirán el dictamen y comentarios emitidos por los evaluadores y deberán dar respuesta a cada una de las observaciones, señalando las modificaciones realizadas al último manuscrito. Se les establecerá un tiempo de respuesta que deberán respetar o el manuscrito será rechazado. En esta etapa, los autores tienen hasta 15 días para atender los cambios.

Los trabajos aceptados por evaluadores externos pasarán al proceso de corrección de estilo y revisión de formato, para adecuarlos al estilo editorial de la revista. Al terminar este proceso se emitirá la aceptación final del documento y se enviarán las pruebas de galera. Una vez enviadas las pruebas de galera el autor tendrá cuatro días naturales para su revisión; de no recibir respuesta en el tiempo indicado, el artículo se publicará con base en el criterio del editor de la revista.

En caso de que él o los autores requieran de un mayor tiempo para la respuesta, en las distintas etapas del proceso, deberán solicitarlo oportunamente al editor de la revista. En caso de que los interesados necesiten modificar al autor de correspondencia, este deberá ser parte de

los autores inicialmente propuestos. Es necesario que se justifique el cambio por escrito, donde se incluya la firma de ambos autores (actual y propuesto). El nuevo autor de correspondencia deberá firmar todos los documentos requeridos para publicar en CienciaUAT.

## **Preparación del manuscrito**

### **3.1. Generalidades**

El manuscrito estará escrito en procesador de texto Word, con letra Times New Roman a 12 puntos, a espacio y medio (1.5), en hoja tamaño carta, con margen en los cuatro costados de 2.54 centímetros. Las páginas estarán numeradas en forma continua. También los renglones deberán estar numerados en forma continua para facilitar el proceso de evaluación.

La redacción del manuscrito será en pasado y en forma impersonal.

Los agradecimientos se incluirán al final del texto solo para el caso de fuentes de financiamiento.

Las tablas y figuras (gráficos, imágenes, mapas conceptuales, mapas geográficos, fotografías, entre otros) deberán estar referenciadas en el texto y ubicarse al final del manuscrito, cada una en hoja separada. Llevarán títulos en español e inglés.

Las tablas se presentarán en formato Word y no como imágenes. Se debe evitar repetir innecesariamente en el texto la información incluida en las tablas, con excepción de aquella indispensable para la discusión de los resultados.

Las figuras (revisar formato de figuras) serán preferentemente a color, excepto las imágenes que de origen se generen en tonalidades de gris (micrografías, por ejemplo). Se deben enviar adicionalmente por separado en formato jpg a 300 dpi o superior, para asegurar la calidad de su impresión, así como el archivo editable en el que fueron generadas.

El texto que describe las figuras (nombre y descripción) estará redactado en forma independiente de las mismas y no deberá formar parte de la imagen.

En caso de utilizar mapas, estos deberán especificar coordenadas, indicando el área o lugar de estudio, atendiendo el siguiente formato: 98°12'15" W o 45°23'10" N. Cuando se trate de un polígono, es necesario indicar las coordenadas extrema superior izquierda y extrema inferior derecha. Las altitudes sobre el nivel del mar se citarán en metros. La rosa de los vientos deberá estar incluida en la parte superior izquierda, al interior de la figura para indicar la orientación.

En los manuscritos aceptados, el autor de correspondencia deberá proporcionar fotografía(s) para ilustrar la portada de su trabajo, en formato jpg a 300 dpi o superior. Además de enviar una imagen (tabla, gráfico, fotografía) para incluirla en la tabla de contenidos, acompañando al título de su contribución.

### **Estructura de los artículos científicos**

Los manuscritos en formato de artículo científico tendrán una extensión máxima de 25 cuartillas (incluyendo tablas y figuras) y constará de las siguientes secciones:

#### **Título**

Deberá describir con claridad el contenido en un máximo de 150 caracteres en español (sin espacios).

#### **Title**

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de lo que se expresa en español en el título.

Título corto (español) Es necesario sugerir un título corto para su contribución de máximo 6 palabras.

#### **Resumen**

El resumen en español no debe ser mayor a 300 palabras. Se debe incluir una breve introducción, el objetivo, metodología más importante, principales resultados y una conclusión.

#### **Palabras clave**

Se deben incluir de 3 a 5 palabras clave.

#### **Abstract**

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de lo que se expresa en español en el resumen. No se establece un número

máximo de palabras, pero no debe ampliarse el contenido innecesariamente, excepto para expresar adecuadamente la idea original.

#### **Key words**

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de las palabras clave.

#### **Introducción**

Su extensión máxima será de 3 cuartillas. Consistirá de una revisión actualizada de la literatura científica que destaque la importancia del estudio realizado. Los antecedentes, marco contextual, marco conceptual, marco metodológico y justificación, considerados necesarios para entender el alcance del conocimiento generado, pueden ir en esta sección de manera resumida y continua, sin subdividirla en secciones con encabezados. Debe concluir con el objetivo del trabajo.

#### **Materiales y métodos**

Se debe proporcionar la información técnica suficiente que permita replicar el trabajo o validar su credibilidad. Incluirá el diseño experimental (en su caso), método estadístico, principales métodos de análisis usados y las fuentes de donde fueron obtenidos o modificados, así como la forma en que se obtuvieron los especímenes de estudio (en su caso).

Los equipos mencionados deben indicar marca, modelo y origen (ciudad y país). Se deben incluir todos los aspectos éticos considerados para trabajar con personas o animales.

Se debe proteger la identidad y los datos personales de los participantes en el estudio, asegurándose de obtener el consentimiento informado de las personas antes de divulgar cualquier información confidencial.

En los estudios del área de salud, se debe hacer mención expresa del comité de ética que aprobó el protocolo de investigación. En caso de que se haya trabajado con humanos, se manifestará de forma explícita el haber obtenido por escrito el consentimiento informado por parte de los mismos. Todos los procedimientos que se lleven a cabo en humanos deberán ajustarse a las normas éticas sobre experimentación humana de la Declaración de Helsinki de 1975.

En los estudios en que se utilicen animales de experimentación o que sean propiedad de particulares, se indicará claramente que se implementaron las medidas adecuadas para minimizar el dolor y la incomodidad, y se deberá contar con una declaración que identifique el comité de revisión de ética que garantizó y aprobó la metodología de trabajo. Si se trabajó con animales propiedad de particulares o clientes, en ensayos clínicos, se deberá haber obtenido el consentimiento informado del propietario y declararlo explícitamente en el documento.

Los experimentos y ensayos clínicos con personas o animales deben realizarse de acuerdo a las directivas establecidas por el Instituto Nacional de Salud (National Institutes of Health) en Estados Unidos de América, o con las Directivas del Consejo de la Comunidad Europea del 24 de noviembre de 1986 (86/609/EEC), y de acuerdo con las leyes y regulaciones nacionales y locales. Los editores se reservan el derecho a rechazar aquellos trabajos que ofrezcan dudas respecto a la obtención de un permiso adecuado o a la aplicación de procedimientos apropiados.

#### **Resultados y discusión (pueden aparecer de manera independiente)**

Adicional al ejercicio de señalar cuáles fueron los resultados encontrados, estos deberán ser contrastados con la literatura científica reciente, para establecer fehacientemente que el conocimiento generado es nuevo, novedoso o innovador.

#### **Conclusiones**

Se deben resaltar en forma breve el o los logros principales, de manera concreta y clara, evitando repetir las discusiones de resultados previos.

#### **Conflictos de intereses**

Indicar si se tiene o se considera tener conflicto(s) de in-

tereses, como el recibir o haber recibido en el pasado algún tipo de apoyo de alguna empresa o institución a quienes los resultados encontrados les favorezcan; o tener animadversión manifiesta o expresada de alguna forma contra alguna instancia o empresa a la que los resultados les afecte. Se recomienda revisar la política de conflictos de intereses.

#### **Agradecimientos**

En caso de haber recibido apoyo de alguna institución deberá ser señalado indicando el tipo de apoyo y en su caso el número de referencia del mismo.

#### **Referencias**

Al menos el 40 % de las referencias usadas para sostener los resultados y su aportación a la ciencia serán de los últimos 5 años. Ver las instrucciones para referencias (sección posterior en este documento).

#### **Estructura de las revisiones actualizadas**

Los manuscritos en formato de revisión actualizada tendrán una extensión máxima de 20 cuartillas (incluyendo tablas y figuras) y constará de las siguientes secciones:

##### **Título**

Describirá claramente el contenido del trabajo, en un máximo de 150 caracteres (sin espacios).

##### **Title**

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de lo que se expresa en español en el título.

##### **Título corto (español)**

Es necesario sugerir un título corto para su contribución de máximo 6 palabras.

##### **Resumen**

Tendrá una extensión máxima de 250 palabras y deberá describir con claridad la temática que se revisa, su importancia y alcance. Se integrará por tres elementos: una breve introducción, el objetivo del trabajo y una conclusión que incluya la aportación del mismo.

##### **Palabras clave**

Se deben incluir de 3 a 5 palabras clave.

##### **Abstract**

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de lo que se expresa en español en el resumen. No se establece un número máximo de palabras, pero no debe ampliarse el contenido innecesariamente, excepto para expresar adecuadamente la idea original.

##### **Key words**

Es la traducción adecuada y fiel al inglés de las palabras clave.

##### **Introducción**

Es la primera parte del manuscrito y en ella se debe introducir al lector en la temática que se abordará, su importancia, justificación, y en su caso, marco contextual, marco conceptual y marco metodológico, considerados necesarios para entender el alcance del conocimiento generado, pueden ir en esta sección de manera resumida y continua sin subdividirla en secciones con encabezados. Debe concluir con el objetivo del trabajo.

Esta sección irá seguida por el cuerpo del documento, que deberá estar dividido en secciones de acuerdo a las temáticas a considerar en el mismo.

##### **Secciones**

Se espera una amplia revisión bibliográfica que permita al lector profundizar en los avances recientes del tema que se describe, por lo que más del 50 % de las referencias mencionadas en cada sección (incluyendo introducción) deberán haber sido publicadas en los últimos 5 años, indicando particularmente lo más recientemente descubierto (año actual o anterior).

##### **Conclusiones**

Se debe resaltar el o los avances principales en el campo, de manera concreta y clara, evitando repetir el análisis de las secciones descritas en el cuerpo del documento.

##### **Referencias**

Al menos el 50 % de las referencias serán de los últimos 5 años. Ver las instrucciones para referencias (sección posterior en este documento).

##### **Conflictos de intereses**

Indicar si se tiene o se considera tener conflicto(s) de intereses, como el recibir o haber recibido en el pasado algún

tipo de apoyo de alguna empresa o institución a quienes los resultados encontrados les favorezcan; o tener animadversión manifiesta o expresada de alguna forma contra alguna instancia o empresa a la que los resultados les afecte. Se recomienda revisar la política de conflictos de intereses.

#### **Agradecimientos**

En caso de haber recibido apoyo de alguna institución deberá ser señalado indicando el tipo de apoyo y en su caso el número de referencia del mismo.

#### **Aspectos adicionales**

##### **Abreviaciones y siglas**

Las palabras o frases que deberán usarse frecuentemente en el manuscrito pueden ser sustituidas por sus abreviaciones, preferentemente por aquellas que sean de uso común en el campo, por ejemplo capacidad de retención de agua (CRA), índice de masa corporal (IMC). También es posible usar abreviaciones concebidas especialmente para el manuscrito, si son descritas previamente, como: Cuestionario médico de estrés laboral (CMEL).

En el caso de utilizar siglas en inglés en los nombres de los cuestionarios, de algún método o instrumento de medición, deberá definir el significado de los mismos. Por ejemplo: cuestionario de control de la imagen corporal en fotografías (BICP, por sus siglas en inglés: body image control in photos questionnaire); secuenciación de siguiente generación (NGS, por sus siglas en inglés: next generation sequencing). También deberán describirse los nombres de organizaciones como la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés: Food and Drug Administration).

##### **Unidades de medición**

Las unidades de cualquier dato científico o de laboratorio y su abreviación deberán seguir el sistema internacional de unidades (SI) descrito por el Centro Español de Metrología (Novena edición). No deberá usarse punto en las abreviaciones (ejemplo kg, cm, °C, ó m). Las unidades en grados y el símbolo de % deben ir separados de los números: 27 °C, 83 %.

Se deben utilizar unidades en el siguiente formato: rad/s, y no en rad \* s<sup>-1</sup>. Otro ejemplo: se debe usar kg/m<sup>3</sup> en lugar de kg m<sup>-3</sup> (kg x m<sup>-3</sup> o kg \* m<sup>-3</sup>).

##### **Referencias en el texto**

Todas las publicaciones citadas en el texto del manuscrito aparecerán en la sección de referencias y viceversa. Se deben seguir las recomendaciones de la Guía de Normas APA 7<sup>a</sup> edición español, excepto para el uso del et al., que es una locución en latín para abreviar la frase “y colaboradores”, lo cual se hará en el formato “y col.”. Los nombres de los autores y las fechas de las citas señaladas en el manuscrito deberán coincidir con el listado de la sección de referencias. Asimismo, revisar que todos los elementos de una referencia bibliográfica estén incluidos. Es responsabilidad del autor de correspondencia la correcta redacción de los nombres de los autores de los trabajos citados en su artículo o revisión.

Las citas o referencias insertadas en los lugares correspondientes del texto deberán ir entre paréntesis y contener el apellido paterno del autor y el año de publicación, ejemplo: (Martínez, 2015). También es posible que el autor utilice dos apellidos unidos con un guión (Martínez-González, 2019).

En el caso de dos autores se usará (Martínez y Gómez, 2014).

Para señalar más de dos autores se usará (Martínez y col., 2014).

En caso de más de una referencia, deberán separarse con punto y coma, y estarán ordenadas de acuerdo a la antigüedad (Martínez y Gómez, 2012; Martínez y col., 2014). Si dos o más referencias fueran del mismo año, se ordenarán de acuerdo al abecedario (Martínez y Gómez 2012; Martínez y Hernández, 2012; Miranda 2012).

Cuando las referencias van fuera del paréntesis, se deberán separar con coma o con el conjuntivo “y”, según corresponda, ejemplo: Gallegos y Elgier (2020), Torralbas (2020) y Rodríguez y col. (2021), quienes señalaron que...

Si existen dos referencias de los mismos autores en el mismo año, que pudieran confundirse, se usarán letras minúsculas, de acuerdo al abecedario (Martínez y Gómez, 2014a; 2014b).

Las citas textuales (texto copiado íntegramente, usadas excepcionalmente en el manuscrito, con extensión menor de 40 palabras), deberán ir entre comillas dobles, anotando entre paréntesis además del autor y el año, la(s) página(s) correspondiente(s), ejemplo: “El efecto placebo desapareció cuando...” (Martínez, 2015: 126); Martínez (2015), encontró que: “El efecto placebo desapareció cuando...” (p. 126).

En caso de utilizar una fuente secundaria (lo cual debe hacerse con moderación, cuando la obra original ya está agotada o solo disponible en otro idioma), debe mencionarse de la siguiente manera: tomada del informe bienio (2008-2009), Observatorio Iberoamericano de Economía Social y Cooperativa (oibes-coop) citado en Chaves-Avila y Pérez-de-Uralde (2012) y Chaves-Avila y col. (2013) (Tabla 3). En la lista de referencia se ubicará la fuente secundaria.

En caso de usar autor corporativo, como institutos, ministerios, organizaciones, entre otros, definirá el significado de las siglas la primera vez que aparezca la cita. Ejemplo: según datos del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS, 2015)...., y en lo subsecuente solo incluirá las siglas (IMSS, 2015).

También, en el caso de utilizar siglas en inglés, definirá el significado de las mismas. Por ejemplo, de acuerdo a la Asociación Americana de Antropología (AAA, por sus siglas en inglés: The American Anthropological Association) (AAA, 2008).

Los textos de materiales legales se citan de la siguiente forma: La Constitución Mexicana de los Estados Unidos Mexicanos (2013), en su artículo 27, establece que:

“La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación”...

En las comunicaciones personales, cartas y correos electrónicos se incorporará información adicional a la sugerida por el APA para poder identificar el origen de la misma: (Luis Fuentes-García, procesador de jaiba en Tampico, Tamaulipas, comunicación personal, 12 de junio, 2015).

Si la información proporcionada a través de una comunicación personal se encuentra disponible en un documento recuperable deberá ser citada dicha fuente en el texto (Fuentes, 2015) y en la sección de referencias en el formato de documento de archivo.

No se incluirán referencias o notas al pie de página.

Se deben evitar citas a tesis, manuales, apuntes y cualquier otro material que sea difícil de consultar.

## Referencias

Las referencias bibliográficas deberán aparecer al final del manuscrito en orden alfabético y cronológico usando la técnica de sangría primera línea (1.25 cm) como se observa en los ejemplos de esta sección.

### Artículos científicos

Aburto, J. M., Schöley, J., Kashnitsky, I., Zhang, L., Rahal, C., Missov, T. I., Mills, M. C., Dowd, J. B., & Kashyap, R. (2022). Quantifying impacts of the COVID-19 pandemic through life-expectancy losses: a population-level study of 29 countries. *International Journal of Epidemiology*, 51(1), 63-74. Agregar el identificador de objeto digital (Digital Object Identifier: DOI)\*

Bustos, G. y Pérez, R. (2018). Relación entre factores psicosociales y el Índice de Función Sexual Femenina en población rural de la comuna de Teno, región de Maule. *Perinatología y Reproducción Humana*, 32(1), 9-18. DOI

Chao, A. & Jost, L. (2012). Coverage based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*, 93(12), 2533-2547. DOI

Figueroa, K. M. (2020). Tratamientos psicológicos para mejorar la vida sexual en mujeres supervivientes de cáncer ginecológico: revisión sistemática. *Psicooncología*, 17(2), 293-309. DOI

González, R. (2016). Presentación: la perspectiva y el debate acerca de una economía cooperativa, solidaria y autogestionaria como centro de una economía social. *Revista de la Academia*, (21), 5-29. DOI

Tejada, K., González, A., Carty, E. y Camarena, F. (2023). Abundancia y diversidad de aves playeras en la playa El Agallito, distrito de Chitré, provincia de Herrera. *Tecnociencia*, 25(1), 41-62. DOI

En general, se citarán de acuerdo con la Guía de Normas APA 7a edición español, con las siguientes especificaciones:

En las referencias se incluirán hasta un máximo de 20 autores. En referencias con 2 a 20 autores se usará el vocablo “y” para señalar al último autor en citas de material publicado en español y el símbolo “&”, precedido por una coma (, &) para indicar el último autor en citas publicadas en inglés.

En las referencias de 21 o más autores se nombrarán los primeros 19 autores en el orden en que aparecen, seguidos de tres puntos...y el último autor, sin el uso del vocablo “y” o el símbolo “&”.

Nota 1: en revistas de publicación continua, que asignan número de páginas se usará el siguiente formato: *PLoS ONE*, 14(9), Article e0222224. DOI

\*Nota 2: en caso de que la referencia contengan el DOI, se recomienda colocarlo según sea el caso.

## Libros

### Libro impreso

Ruiz, C. P. (2021). La culpa en la mujer. Una emancipación pendiente. Síntesis.

### Libro en línea

Arias, S. y D. Aquino. (2019). Familia Cactaceae I. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 209. Instituto de Ecología, A.C. DOI o Agregar el localizador de recursos uniforme (Uniform Resource Locator: URL).

### Libro con editor

Alanís-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A. y Marroquín-de-la-Fuente, J. S. (Eds.) (2020). *Muestreo ecológico de la vegetación*. Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

### Capítulos de libros

Quintero, Y. y Del-Carpio, P. (2020). Encuentros y desencuentros en la familia tras el COVID-19. En Y. del-Valle, D. Alvarez, J. Batista y D. Rojas (Eds.), *Impacto del COVID-19 desde la perspectiva socio-económica en el contexto global* (pp. 31-34). Fondo Editorial Universitario Servando Garcés de la Universidad Politécnica Territorial de Falcón Alonso Gamero y ALININ. URL o DOI

Viter, R. & Latsunskyi, I. (2019). Metal oxide nanostructures in sensing. In O. V. Zenkina (Ed.), *Nanomaterials design for sensing applications* (pp. 41-91). Elsevier.

Bird, M. (2016). Economic aspects of entrepreneurship: The case of Peru. En C. C. Williams & A. Gurtoo (Eds.), *Handbook of entrepreneurship in developing economies* (pp. 113-130). Routledge.

### Artículos de periódico

Carreño, L. (9 de febrero de 2020). La disputa gremial por los aranceles a las prendas de vestir. *El Espectador*. <https://www.elespectador.com/economia/la-disputa-gremial-por-los-aranceles-las-prendas-de-vestir-articulo-903768>

### Entrevistas

Nacif, B. (2018). Presidente de la Comisión de Prerrogativas del Instituto Nacional Electoral (INE), Ciudad de México, México.

### Sitios, páginas y libros electrónicos

National Cancer Institute (2019). SEER Cancer Stat Facts. [En línea]. Disponible en: <https://seer.cancer.gov/statfacts/html/mulmy.html>. Fecha de consulta: 10 de agosto de 2022.

### Cuando la referencia es de un documento de archivo PDF

Rodríguez, R. (2019). Una guía para combatir el Bullying [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://www.url.com>. Fecha de consulta: 3 de febrero de 2023.



Authors are required to send an email to [cienciauat@uat.edu.mx](mailto:cienciauat@uat.edu.mx) to formally request a username and a password so they can register at the journal's portal.

As part of their submission, authors must include the title of their manuscript, an abstract and an official email address from their educational institution or research center (public or private). Manuscripts will not be received by any other print or electronic means.

It is necessary to review the editorial guidelines and the editorial policies before the submission of a manuscript.

## Instructions for authors

### 1.1. Submissions

The journal welcomes articles and critical literature reviews in Spanish, which are mainly focused on Latin American issues, and within the following fields of knowledge:

- Physics, Mathematics and Earth Sciences
- Biology and Chemistry
- Medicine and Health Sciences
- Humanities and Behavioral Sciences
- Social Sciences
- Biotechnology and Agricultural Sciences
- Engineering

### 1.2. General considerations

Manuscripts submitted to the journal should be original, unpublished and not being under consideration for publication simultaneously in another journal or editorial agency. Manuscripts should have scientific quality and use clear and accurate language, defining technical terms as necessary to make it accessible to readers from other academic fields and levels. It is important to consider that the journal is multidisciplinary, and therefore, its readers come from widely diverse backgrounds.

The following sections should be written in Spanish and English: title, abstract, key words, tables and figures captions. Figures (images, graphs, geographic maps, conceptual maps, among others) should be additionally sent in a separate file in jpg format 300 dpi or higher to ensure printing quality (Please review the figures' specifications). The editable file of the figures should also be attached.

The text should be adhered to the guide for the use of International System of Units.

The author is responsible for the appropriate use of academic writing in each of the sections of the manuscript.

### 1.3. Authors

The number of authors of the manuscript should be in accordance with the quality and the quantity of the work carried out and presented. An unjustified number of authors may cause the rejection of the manuscript.

The manuscript must include a cover page, which should include the full name(s) of the author(s), (no initials should be used; both last names should be hyphenated).

The affiliation of the corresponding author should be provided in the following order: institutional affiliation (public or private) name of school or faculty, institute or research center, unit or department; address (including street, number, neighborhood, city, state, country, zip code) and email address for correspondence.

A telephone number with the international code should also be provided (for editorial communication only).

The contact information of the rest of the authors should be provided in the following order: institutional affiliation (public or private) name of school or faculty, institute or research center, unit or department, city, state and country.

For all the authors, information related to the Conahcyt CVU number, ORCID iD, and level of SNII, in case they are members of it, should be provided.

### Peer review and follow-up

The username and password allow the corresponding author to log in and upload their manuscript to the platform. They will also be used to continue the editorial process, review the status of their manuscripts, once the manuscript has met the formatting requirements and been assigned to a field editor.

The editorial process is developed into four stages:

Formatting assessment.

Field editor screening.

Anonymous peer review.

Editorial design and adjustment.

Authors are expected to fully comply with the revisions required in each of the four stages of the review process, highlighting in red color the changes made to the most updated version of the manuscript (authors are expected to use the same Word document received in each of the stages).

In the formatting assessment stage, manuscripts will be subject to a preliminary review by members of the Editorial Department of the journal, to ensure that they meet the thematic and format requirements, and to analyze the levels of similarity with previously published material (through the iThenticate software). Once all the general considerations for publication are fulfilled, the manuscript will be assigned to the area editor. Those manuscripts that fail to complete this stage within a 30 day period will be cancelled.

In the second stage, the area editor will assess the relevance of manuscripts to determine whether they are sent out for peer review or not. It is possible for the area editor to provide the authors with feedback and may even require a second round of review prior to making a final decision. As such, authors will have 10 days to submit their manuscript with the required changes.

From this stage, in addition to making each of the required corrections, which will need to be highlighted in red color on the most recent version of the manuscript, authors will need to submit a separate form in which they provide a detailed response to each of the comments or suggestions, indicating the line numbers on which they are located.

Those manuscripts approved by the area editor will then be assigned to at least two expert and external peer reviewers, who will determine whether they are accepted or rejected based on an academic and scientific analysis. In the event of disagreement between the reviewers' decisions, the manuscript will be sent out to a third reviewer, whose decision will define its acceptance or rejection.

Authors will receive the decision and comments made by the reviewers and will be required to provide a response to each of the comments, indicating the changes made on the last version of the manuscript. They will have a 15-day period to revise the manuscript as required by the reviewers. Failure to make the required corrections within the specified time frame will result in manuscript rejection.

All manuscripts accepted by the peer reviewers will undergo a process of editorial and format revision to adjust them to the required publication format of the journal. Once this stage is completed, the acceptance letter of the manuscript will be issued and the proofs will be sent to the authors, who will have four calendar days to check and correct them. If the authors do not respond within the time frame, the article will be published following the Editor's judgment.

In the case the authors need an extension to respond to the requirements in any of the different stages of the process, they will have to make a formal request to the journal's Editor. In case the authors need to replace the corresponding author, the new one will have to be one of the initially listed authors. It is necessary to submit a form, on which the authors provide a written justification of the replacement request. The form will also have to include the signatures of both, the current and the proposed corresponding authors. The new corresponding author will be expected to sign all the required documents to publish in the CienciaUAT journal.

## **Manuscript preparation**

### **3.1. General considerations**

The manuscript should be written in Microsoft Word, with a 12-point Times New Roman font, spaced at 1.5, formatted into Letter page size, with 2.54 cm margins on every side. Pages should be numbered sequentially. Lines should also be numbered sequentially to facilitate the evaluation process.

The manuscript must be written in past tense and in an impersonal form. Acknowledgments must be included in the final part of the text and only for cases of sources of financial support.

Tables and figures (graphs, images, conceptual maps, geographic maps, photographs, among others) must be referenced in the text and placed towards the end of the manuscript, each in a separate sheet. They will include captions in both Spanish and English.

Tables need to be presented in MS Word format and should not be included as images. Information included as part of tables and figures should not be repeated in the text, except when it is necessary for the discussion of results.

Figures (review figures format) should be preferably provided in color, except those images that are originally generated in grayscale shades (micrographs, for example). Figures should be additionally submitted in a separate file in jpg format at 300 dpi or higher to ensure printing quality. The editable file in which they were generated should also be submitted.

The text describing the figures (title and description) must be drafted independently and not as part of the image.

In case maps are used, these should specify geographical coordinates indicating the area or place of study, adhering to the following format: 98°12'15" W o 45°23'10" N. When it comes to a polygon, the upper left and lower right coordinates should be indicated. The altitude above the sea level should be cited in meters. The wind rose should be included in the upper left corner, within the figure to indicate its orientation.

In the case of those accepted manuscripts, the corresponding author should provide photograph(s) to illustrate the cover page of their work in a jpg format at 300 dpi or higher. Additionally, an image (table, graph or photograph) should be submitted to be included in the Table of Contents, alongside the title of their contribution.

### **Structure of the articles**

Manuscripts in the form of scientific articles must have a maximum of 25 pages (including figures and tables) and will include the following sections:

#### **Title**

The title should clearly describe the contents of the article within a length of 150 characters in Spanish (without spaces).

#### **Title**

It is the appropriate and accurate translation of the Spanish title into the English language.

Short title (Spanish). Authors should also provide a shorter version (maximum 6 words) of the manuscript title.

#### **Abstract**

The abstract in Spanish must not exceed 300 words, including a brief introduction, the objective or purpose, the methods used, main findings and a conclusion.

#### **Keywords**

A list of three to five keywords should be included.

#### **Abstract**

It is the appropriate and accurate translation of the Spanish abstract into the English language. There is not a word limit, but its contents should not be extended unnecessarily, except for the need to express its original idea adequately.

#### **Keywords**

An appropriate and accurate translation of the list of the keywords should be provided.

#### **Introduction**

Its length should not exceed 3 pages. It should include an updated review of the relevant literature, where the importance of the study must be highlighted. The background, the context where the study is situated, theoretical framework, methods used, and the contribution of the study, which are often considered essential to understand the scope of the research, can be provided in a concise manner within this section. The section should conclude with a description of the main aims of the study.

#### **Materials and methods**

The Materials and Methods section needs to provide sufficient information in a way that the study can be replicated or that its credibility can be assessed. The experimental design (if applicable), statistical method, data sources and techniques of analysis used need to be clearly indicated. In case specimens are used, the procedures followed to gain access to them need to be clearly described.

Brand names, year and origin (city and country) of the research devices used for the study need to be clearly indicated. All the ethical considerations related to research that involves persons or animals should be clearly discussed.

The identity and personal data of the participants in the study need to be protected, securing the informed consent from the involved parties before the dissemination of any confidential information.

In the case of health related studies, a reference needs to be made to the Ethics committee that approved the research protocol. Furthermore, in the case of those studies whose research subjects are humans, copies of the signed informed consent forms need to be provided. In all the cases, studies in which humans are involved must adhere to the ethical guidelines for human experimentation as stated in the 1975 Declaration of Helsinki.

In the case of the studies that make use of animals for experimentation, all the appropriate measures implemented to minimize pain and uneasiness need to be clearly indicated. In addition, a declaration identifying the ethics committee that approved that research methodology needs to be provided in the methods section. Similarly, when animals are used in clinical trials, the informed consent from their owners or customers needs to be gained and explicitly declared in the document.

The experiments and clinical trials with persons or animals should be conducted following the guidelines established by the National Health Institute (National Health Institute) of the USA, particularly those related to the care and use of animals in experimentation procedures. Alternatively, the guidelines for ethical practice developed by the European Community Council dated November 24, 1986 (86/609/eec) can also be followed in accordance with national and local laws and regulations. The editors of the journal reserve the right to reject those works that appear to have failed to secure an adequate informed consent from the involved parties or to apply appropriate procedures.

#### **The results and discussion sections can be presented separately.**

The main findings should be presented and related to current literature in a way that justifies the innovative contribution that the study makes to the advancement of knowledge.

#### **Conclusions**

The main contributions of the study should be highlighted in a clear and concrete manner, avoiding the repetition of discussion of previous findings.

### **Conflict of interests**

Authors are required to declare any potential sources of conflict of interest such as being the recipients of funding either now or in the past from a business or institution which can positively influence the outcomes of the research. Likewise, any adverse feeling towards enterprises, institutions or groups that can negatively affect the outcomes of the research should also be declared. We recommend that you consult our (conflict of interest policy).

### **Acknowledgements**

In case the authors received any financial support for their study, they should provide details such as the name of the funding agency and grant number.

### **References**

At least 40% of all the references used in the article should be from the last 5 years. Please see the instructions for the list of references (backside of this document).

### **Structure of literature reviews**

Manuscripts in the form of literature reviews must have a maximum of 20 pages in length (including figures and tables) and will include the following sections:

#### **Title**

The title should clearly describe the contents of the article within a length of 150 characters in Spanish (without spaces).

#### **Title**

It is the appropriate and accurate translation of the Spanish title into the English language.

#### **Short title (Spanish).**

Authors should also provide a shorter version (maximum 6 words) of the manuscript title.

#### **Abstract**

The abstract in Spanish must not exceed 250 words, including a description of the topic being reviewed, its relevance and scope. It should be composed of three elements: a brief introduction, the main aim(s) and a conclusion that includes the contribution of it.

#### **Keywords**

A list of three to five keywords should be included.

#### **Abstract**

It is the appropriate and accurate translation of the Spanish abstract into the English language. There is not a word limit, but its contents should not be extended unnecessarily, except for the need to express its original idea adequately.

#### **Keywords**

An appropriate and accurate English translation of the list of the keywords should be provided.

#### **Introduction**

It is the first part of the manuscript and should contain a discussion of the topic being addressed, its significance, justification, and, if relevant, the context where the study is situated, theoretical framework and the methods used, which are often considered essential to understand the scope of the research, can be provided in a concise manner within this section. The section should conclude with a description of the main aims of the study.

This section should be followed by the body of the document, which should be divided into sections based on the themes under consideration.

#### **Sections**

A broad and critical review of the literature is expected in a way that allows the readers to deepen their understanding of the most recent advancement of the topic being addressed. Therefore, at least 50 % of the references cited in each section (including the introduction) should have been published within the last 5 years, placing emphasis on studies published during the current or last year.

#### **Conclusions**

The main contributions to knowledge in the field should be highlighted in a clear and concrete manner, avoiding the repetition of any analysis previously discussed in the body of the document.

#### **References**

At least 50 % of all the references used in the article

should be from the last 5 years. Please see the instructions for the list of references (backside of this document).

### **Conflict of interests**

Authors are required to declare any potential sources of conflict of interest such as being the recipients of funding either now or in the past from a business or institution which can positively influence the outcomes of the research. Likewise, any adverse feeling towards enterprises, institutions or groups that can negatively affect the outcomes of the research should also be declared. We recommend that you consult our (conflict of interest policy).

### **Acknowledgements**

In case the authors received any financial support for their study, they should provide details such as the name of the funding agency and grant number.

### **Additional aspects**

#### **Abbreviations and acronyms**

Word or phrases that will be used frequently throughout the manuscript can be replaced by their abbreviations, preferably by those which are commonly used in the field, e.g. water retention capacity (WRC), body mass index (CMI). Similarly, the use of abbreviations that are generated specifically for the study is also allowed, as long as they are previously described, e.g. work stress questionnaire (WSQ).

In case English acronyms are used in the names of questionnaires or any measurement method or instrument, authors are expected to indicate what they stand for in the first place. For example, cuestionario de control de la imagen corporal en fotografías (BICP, por sus siglas en inglés: body image control in photos questionnaire); secuenciación de siguiente generación (NGS, por sus siglas en inglés: next generation sequencing). In addition, the names of organizations should be described, e.g. la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés: Food and Drug Administration).

#### **Measurement units**

The units of any scientific or lab data and their abbreviation should adhere to the international system of units (SI) described by the Spanish Metrology Center Centro Español de Metrología (Ninth edition). No dots should be used in the abbreviations (e.g. kg, cm, °C, or m). The units in degrees and the % symbol must be separated from the numbers: 27 °C, 83 %.

The units should be used as shown in the following format: rad/s, not in rad \* s<sup>-1</sup>. Another example: kg/m<sup>3</sup> instead of kg m<sup>-3</sup> (kg x m<sup>-3</sup> o kg \* m<sup>-3</sup>).

#### **Citations**

All publications cited in the text of the article must appear in the references section and vice versa. Authors are expected to adhere to the APA 7th edition guidelines in Spanish, except for the use of et al., which is a Latin abbreviation for "and others", and the format "y col." should be used. Authors must verify that the names of the authors and dates cited in the text are exactly the same as those in the list of references. Authors must also make sure that all the elements of bibliographic references are included. It is the responsibility of the author(s) to verify the correct spelling of authors' names cited in articles or literature reviews.

Citations or references inserted in the corresponding places in the text must be placed in parenthesis, contain the last name of the author and include the year of publication. For example: (Martínez, 2015). It is also possible for authors to use their hyphenated last names (Martínez-González, 2019). (Núñez y Pérez, 1983; Núñez y col., 1984). (Núñez y Pérez, 1983a; 1983b).

In the case of two authors, the format (Martínez y Gómez, 2014) should be used.

To indicate more than two authors, (Martínez y col., 2014) should be used.

In case of more than one reference, they should be separated with semi colon, and need to be placed in alphabetical order based on year of publication (from oldest to newest) (Martínez y Gómez, 2012; Martínez y col., 2014).

If two or more citations are from the same year of publication, they will have to be placed in alphabetical order (Martínez y Gómez 2012; Martínez y Hernández, 2012; Miranda, 2012).

When a citation is used out of the parentheses, it should be separated by a comma or with the conjunction “y” (and), if applicable, e.g. Gallegos y Elgier (2020), Torralbas (2020) y Rodríguez y col. (2021), who argued that...

If there are two references of the same authors in the same year of publication, small letters in alphabetical order are used to avoid confusion (Martínez y Gómez, 2014a; 2014b).

Textual citations (entirely copied text) that contain 40 or fewer words will be placed in quotation marks and will include, in addition to the author(s) name and year of publication, the page number(s). For example, “The placebo effect disappeared when...” (Martínez, 2015: 126); Martínez (2015), found that: “The placebo effect disappeared when...”

In case a secondary source (which should be used only when the original item is no longer available or only available in another language) is used, the following format should be used: tomada del informe bienio (2008-2009), Observatorio Iberoamericano de Economía Social y Cooperativa (oibes-coop) citado en Chaves-Avila y Pérez-de-Uralde (2012) y Chaves-Avila y col. (2013) (Tabla 3). The secondary source must also be included in the reference list.

When using corporate authors such as institutes or ministries or organizations among others, acronyms must be spelled out the first time they are cited in the text. Example: according to reports provided by the Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS, 2015)..... Only the acronym will be cited subsequently (IMSS, 2015).

In addition, if acronyms in English are used, they must be spelled out the first time they are cited in the text, e.g. According to the Asociación Americana de Antropología (AAA, por sus siglas en inglés): The American Anthropological Association) (AAA, 2008).

Legal material texts are cited as follows: The Mexican constitution (2008), in its 27 article, establishes that “The property of land and water comprised within the national territory boundaries originally corresponds to the Nation”...

In personal communications, letters, and emails, additional information to that suggested by the APA style should be provided to justify its origin, e.g. (Luis Fuentes-García, procesador de jaiba en Tampico, Tamaulipas, comunicación personal, 12 de junio, 2015).

If the information provided through a personal communication is available in a retrievable document, its source should be cited, e.g. (Fuentes, 2015). It should also be included in the list of references alongside its file format.

No references or notes should be included as footnotes.

No theses, instruction manuals, book notes or any other hard to find material should be cited.

## References

A list of all the references used in the text must be provided at the end of the manuscript in alphabetical and chronological order indenting the first line (1.25 cm), as shown in the examples of this section.

### Scientific articles

Aburto, J. M., Schöley, J., Kashnitsky, I., Zhang, L., Rahal, C., Missov, T. I., Mills, M. C., Dowd, J. B., & Kashyap, R. (2022). Quantifying impacts of the COVID-19 pandemic through life-expectancy losses: a population-level study of 29 countries. *International Journal of Epidemiology*, 51(1), 63-74. Agregar el identificador de objeto digital (Digital Object Identifier: DOI)\*

Bustos, G. y Pérez, R. (2018). Relación entre factores psicosociales y el Índice de Función Sexual Femenina en población rural de la comuna de Teno, región de Maule. *Perinatología y Reproducción Humana*, 32(1), 9-18. DOI

Chao, A. & Jost, L. (2012). Coverage based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by complete-

ness rather than size. *Ecology*, 93(12), 2533-2547. DOI

Figuroa, K. M. (2020). Tratamientos psicológicos para mejorar la vida sexual en mujeres supervivientes de cáncer ginecológico: revisión sistemática. *Psicooncología*, 17(2), 293-309. DOI

González, R. (2016). Presentación: la perspectiva y el debate acerca de una economía cooperativa, solidaria y autogestionaria como centro de una economía social. *Revista de la Academia*, (21), 5-29. DOI

Tejada, K., González, A., Carty, E. y Camarena, F. (2023). Abundancia y diversidad de aves playeras en la playa El Agallito, distrito de Chitré, provincia de Herrera. *Tecnociencia*, 25(1), 41-62. DOI

Generally speaking, the citations should follow the APA 7th edition guidelines, with the following specifications:

References should include up to 20 items. In references with 2 to 20 authors the conjunction “y” to indicate the last author in citations of published material in Spanish and a comma followed by the “&” symbol (, &) to indicate the last author in citations in English.

In citations with 21 or more authors, the first 19 authors should be mentioned in the order in which they appear, followed by three dots...and the last author, without the “y” conjunction or the “&” symbol.

Note 1: in continuous publication journals, which assign page numbers, the following format should be used: *PLoS ONE*, 14(9), Article e0222224. DOI

\*Note 2: in case the reference contains a DOI, it should be provided as used in the original source.

### Books

#### Print book

Ruiz, C. P. (2021). La culpa en la mujer. Una emancipación pendiente. Síntesis.

#### Online book

Arias, S. y D. Aquino. (2019). Familia Cactaceae I. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 209. Instituto de Ecología, A.C. DOI o Agregar el localizador de recursos uniforme (Uniform Resource Locator: URL).

#### Book with an editor

Alanís-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A. y Marroquín-de-la-Fuente, J. S. (Eds.) (2020). *Muestreo ecológico de la vegetación*. Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

#### Book chapters

Quintero, Y. y Del-Carpio, P. (2020). Encuentros y desencuentros en la familia tras el COVID-19. En Y. del-Valle, D. Alvarez, J. Batista y D. Rojas (Eds.), *Impacto del COVID-19 desde la perspectiva socio-económica en el contexto global* (pp. 31-34). Fondo Editorial Universitario Servando Garcés de la Universidad Politécnica Territorial de Falcón Alonso Gamero y ALININ. URL o DOI

Viter, R. & Latsunskyi, I. (2019). Metal oxide nanostructures in sensing. In O. V. Zenkina (Ed.), *Nanomaterials design for sensing applications* (pp. 41-91). Elsevier.

#### Newspaper articles

Carreño, L. (9 de febrero de 2020). La disputa gremial por los aranceles a las prendas de vestir. *El Espectador*. <https://www.elespectador.com/economia/la-disputa-gremial-por-los-aranceles-las-prendas-de-vestir-articulo-903768>

#### Interviews

Nacif, B. (2018). Presidente de la Comisión de Prerrogativas del Instituto Nacional Electoral (INE), Ciudad de México, México.

#### Websites and electronic books

National Cancer Institute (2019). SEER Cancer Stat Facts. [En línea]. Disponible en: <https://seer.cancer.gov/statfacts/html/mulmy.html>. Fecha de consulta: 10 de agosto de 2022.

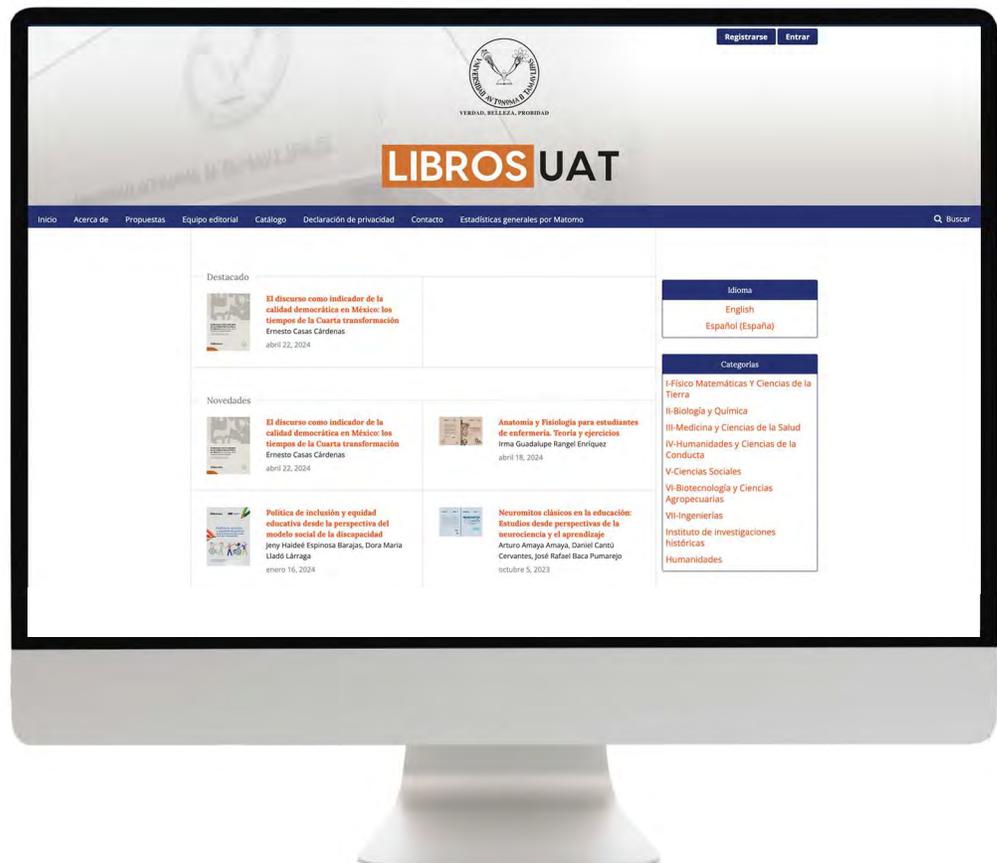
#### When the reference is from a PDF file document

Rodríguez, R. (2019). Una guía para combatir el Bullying [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible en: <https://www.url.com>. Fecha de consulta: 3 de febrero de 2023.

# La **UAT** invita a SUS profesores e investigadores a difundir SUS libros académicos a través del portal **http://libros.uat.edu.mx**

## Ventajas

- Visibilidad internacional
- Descargable en PDF
- Compartir en redes sociales
- Incrementan las citas
- Posibilidad de colaboraciones
- Invitaciones a eventos académicos



# Revista arbitrada e indexada en bases de datos internacionales



Journal Citation Reports™



Envía tus colaboraciones científicas a:

**cienciauat@uat.edu.mx**

# CienciaUAT



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD