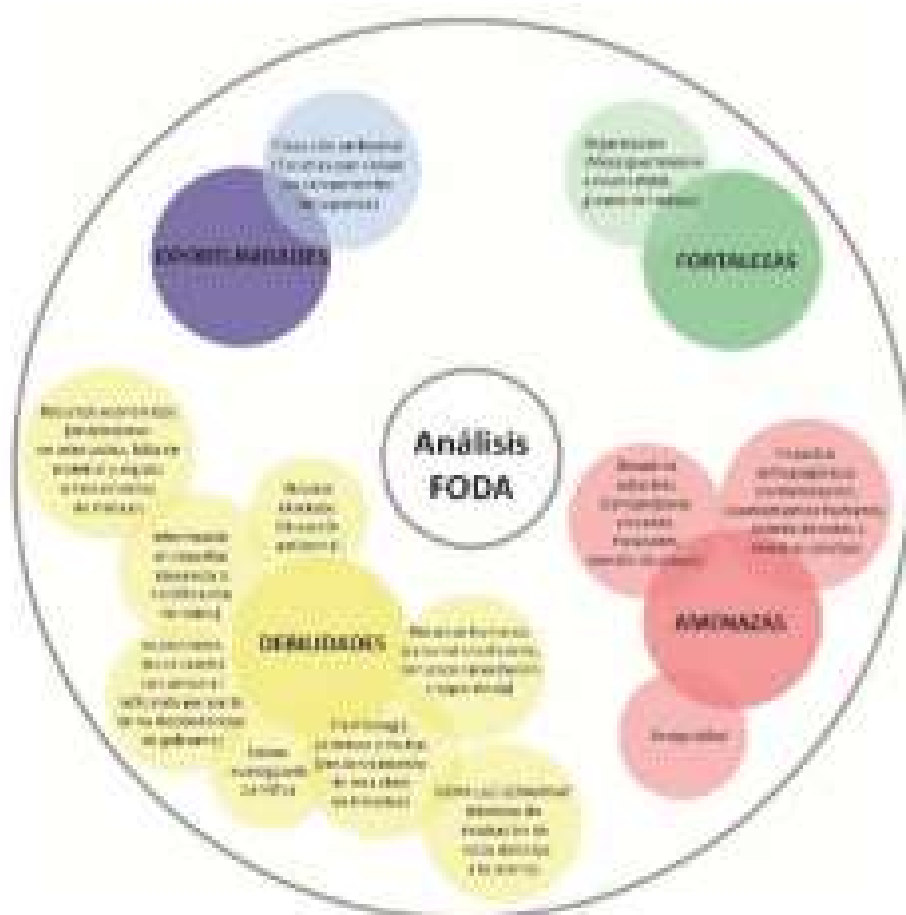




UAGro

Dirección de Investigación



Comité Editorial

Editores Ejecutivos

Dr. Javier Saldaña Almazán

Rector de la Universidad Autónoma de
Guerrero

ID. 0000-0003-1832-9333

Dr. Antonio Zavaleta Bautista

Director General de Posgrado e
Investigación

azavaleta@uagro.mx

ID. 0000-0002-1849-7022

Dr. Javier Jiménez Hernández

Director de Investigación

jjimenez@uagro.mx

ID. 0000-0001-9698-2325

Editor en Jefe

Dr. Oscar Talavera Mendoza

o6269@uagro.mx

Escuela Superior de Ciencias de la Tierra

ID. 0000-0002-4297-2698

Comité científico

Universidad Autónoma de Guerrero

Dr. Sergio Adrián Salgado Souto.

Escuela Superior de Ciencias de la
Tierra. Ciencias de la Tierra, Petrología,
Isotopos estables y radiactivos, Geología
económica y ambiental, Geoquímica,
Contaminación por metales.

sergiosalgado@uagro.mx

ID. 0000-0002-5874-9415

Dr. José Luis Valenzuela Lagarda.

Centro Regional de Educación Superior
de la Costa Chica. Ciencias
agropecuarias, Producción sustentable,
Tecnología de los alimentos,
Aprovechamiento sustentable de los
recursos agropecuarios, Alimentos
nutraceúticos y funcionales, Ciencias
biológicas, Biotecnología, Bebidas
alimentarias.

joseluislagarda@uagro.mx

ID. 0000-0002-9551-2652

Dr. Gabino Solano Ramírez.

Instituto Internacional de Estudios

Políticos Avanzados. Ciencias políticas,

Relación ejecutivo-legislativo, Violencia,

Manejo de conflictos, Estudios

electorales, Partidos políticos.

gabinosln@gmail.com

ID. 0000-0003-2638-7904

Dr. Neftalí García Castro.

Centro de Investigación y Posgrado en

Estudios Socioterritoriales-

Chilpancingo. Vulnerabilidad Social y

disparidades territoriales, Estructura

territorial de la economía,
sustentabilidad

social.

ID. 0000-0003-2605-2207

Dr. José Luis Susano García.

Facultad de Comunicación y

Mercadotecnia. Administración,

Comunicación, Gestión empresarial,

Negocios, Mercadotecnia, Sociología,

Educación, Desarrollo regional, Turismo.

jose.susano@uagro.mx

ID. 0000-0002-1048-1173

Dr. Elías Hernández Castro.

Facultad de Ciencias Agropecuarias y

Ambientales. Ciencias agropecuarias,

Diseño y protección de agroecosistemas

tropicales, Frutales, Agave, Gestión

Local.

ehernandez@uagro.mx

ID. 0000-0001-6573-6236

Dra. Iris Paola Guzmán.

Facultad de Ciencias Químico

Biológicas. Inmunología, Genética,

Epidemiología, Enfermedades crónicas,

Enfermedades autoinmunes, Riesgo

cardiovascular, Malnutrición,

Investigación trasnacional.

pao_nkiller@yahoo.com.mx

ID. 0000-0003-1535-4226

Dr. Roberto Carlos Almazán Núñez.

Facultad de Ciencias Químico-

Biológicas. Fauna silvestre, Ecología de poblaciones y comunidades, Interacciones bióticas, Distribución de especies, Estudios florísticos, Conservación de la biodiversidad, Manejo de recursos naturales, Ecosistemas terrestres.

oikos79@yahoo.com.mx

ID. 0000-0002-9913-2737

Dr. José María Sigarreta Almira.

Facultad de Matemáticas-

Acapulco. Matemática discreta,

Matemática fraccional.

josemariasigarretaalmira@hotmail.com

ID. 0000-0003-4352-5109

Dra. Laura Sampedro Rosas.

Centro de Ciencias del Desarrollo

Regional. Ciencias socioambientales,

Educación ambiental.

laura_1953@live.com.mx

ID. 0009-0001-8797-6190

Dra. María del Socorro García

González.

Facultad de Matemáticas-Chilpancingo.

Educación matemática, Dominio afectivo

en matemáticas, Formación de profesores

de matemáticas.

mgargonza@gmail.com

ID. 0000-0001-7088-1075

Dr. Jaime García Leyva.

Centro Regional de Educación Superior

de la Montaña. Historia, identidad y

pueblos indígenas, Salud y grupos

vulnerables, Medicina indígena,

Educación, lenguas indígenas y

migración, Desarrollo Regional.

jaimegleyva@gmail.com

Dr. Mark Kevin Speakman Darwin.

Facultad de Turismo. Gestión y desarrollo

del Turismo, Crisis y desastres turísticos,

turismo adaptativo, turismo oscuro.

mspeakmanuagro@outlook.com

ID. 0009-0004-2394-3674

Dra. Osbelia Alcaraz Morales.

Facultad de Arquitectura. Arquitectura y
ciudades turísticas

osbeliauagro@gmail.com

ID. 0000-0002-4730-4840

Dr. Jesús Guadalupe Padilla Serrato.

Facultad de Ecología Marina. Biología,
Ecología marina y pesquera, Taxonomía
de peces, Variabilidad ambiental
oceánica, Recursos pesqueros,
Modelación pesquera, Biodiversidad y
ecología trófica, Ambientes marinos
costeros.

jgpadillas@hotmail.com

ID. 0000-0001-6815-9147

Dra. Elvia Garduño Téliz.

Escuela Superior de Ciencias de la
Educación. TIC en educación,
Tecnopedagogía, Personalización del
aprendizaje, Aprendizaje móvil,
Inclusión

educativa, Evaluación educativa,
Educación durante la contingencia.

rhoma714@gmail.com

ID. 0000-0002-5971-4003

Dr. Gustavo Adolfo Alonso Silverio.

Facultad de Ingeniería. Sistemas
electrónicos, sistemas inteligentes.

gsilverio@uagro.mx

ID. 0000-0002-2699-140X

Dr. José Gilberto Grimaldo Garza.

Facultad de Derecho-
Chilpancingo. Derecho constitucional,
Derecho animal, Derecho de la
naturaleza.

garzagrimaldo33@yahoo.com.mx

ID. 0000-0002-2960-1091

Dr. Adelaido Rafael Rojas García.

Facultad de Veterinaria y Zootecnia No
2. Producción de forrajes, Nutrición
animal, Manejo de praderas.

18146@@uagro.mx

ID. 0000-0002-5617-5403

Dra. Mirna Azalea Romero Hernández.
Facultad de Medicina. Medicina general,
Biología molecular y celular en medicina,
Cáncer, Enfermedades del sistema
inmunológico, Enfermedades crónico-
degenerativas, Utilidad terapéutica de
compuestos naturales, Autismo,
Discriminación/inclusión en educación
bioética, Dilemas del inicio y final de la
vida, Atención primaria en la salud.
rhoma714@gmail.com

ID. 0000-0001-9806-0789

Dra. Teolincacihuatl Romero Rosales.
Facultad de Ciencias Agropecuarias y
Ambientales. Ciencias agropecuarias,
Inocuidad alimentaria, Agroecología,
Biocontrol, Gestión local.
teolinc@hotmail.com

ID. 0000-0002-9158-8481

Comité externo

Dr. José Francisco Muñoz Valle.
Centro Universitario de Ciencias de la

Salud, Universidad de
Guadalajara. Ciencias Biomédicas,
Inmunología, Biología molecular,
Genómica.

biologiamolecular@hotmail.com

ID. 0000-0002-2272-9260

Dr. José Luis Aguirre Noyola.
Centro de Ciencias Genómicas,
Universidad Nacional Autónoma de
México. Microbiología, Ecología
microbiana, Genómica, Bioinformática,
Biorremediación, Biología de plantas
jaguirrenoyola@outlook.com

ID. 0000-0002-9695-7901

Dr. Yam Zul Ernesto Ocampo Díaz.
Facultad de Ingeniería. Universidad
Autónoma de San Luis Potosí. Ciencias
de
la Tierra, Geología, Sedimentología,
Petrología Sedimentaria, Proveniencia,
Tectónica.

yamzul.ocampo@uaslp.mx

ID. 0000-0002-4695-442X

n.sandoval@uagro.mx

Dr. Rafael del Río Salas.

ID. 0009-0006-2807-9672

Estación Regional del Noroeste,

MC. Jhonatan Pérez Cristino

Universidad Nacional Autónoma de

Corrección de estilo

México. Ciencias de la Tierra, Geología,

Dr. Elinó Villanueva González

Geoquímica, Isótopos estables, Geología

14203@uagro.mx

económica y ambiental, Contaminación

ID. 0000-0002-6609-4121

por metales.

rdelrio@geologia.unam.mx

ID. 0000-0002-4474-172X

Equipo técnico

Coordinadora editorial

M.CS. Isabel Rivero Cors

isabelrivero@uagro.mx

ID. 0009-0002-9962-9484

Maquetador

Ing. Norberto E. Sandoval Maldonado

Índice

Artículo de investigación

- [Actitudes relacionadas con el consumo de huevo de tortuga marina en la localidad de Llano Real, Guerrero, México: retos y oportunidades](#)

Himmer Castro, Ana I. Casarrubias-Jaimez (Autor/a)

5-15

- [Importancia de los minerales y la biomineralización en la evolución de los metazoarios](#)

Ma Catalina Gómez, María Colín-García² (Autor/a)

16-27

- [Prevalencia del hongo Batrachochytrium dendrobatidis en anfibios distribuidos en bosque mesófilo de montaña en el sur de México](#)

Sarahi Toribio, José Luis Rosa, Yanet Romero, Columba Rodríguez, Sergio García-Ibáñez, Rosa María Brito (Autor/a)

28-40

- [Desafíos, oportunidades y amenazas en la protección y conservación de tortugas marinas en Guerrero, México](#)

José Luis Sandoval, Adriana Sandoval, Rafael Flores, Ricardo Herrera-Navarrete, Himmer Castro, Francisco Rubén Castañeda (Autor/a)

41-55

- [Un modelo de mezclas Bayesiano para describir rebrotes del COVID-19 en el estado de Guerrero, México](#)

Yaineris Ferrán, Francisco J. Ariza, Martín P. Árciga, Jorge Sánchez (Autor/a)

69-81

- [Revisión de los métodos de remediación de suelos agrícolas y forestales afectados por metales y metaloides tóxicos](#)

Fredderick Arroyo, Columba Rodríguez, José Luis Rosas, Oscar Talavera, Elías Hernández, Oscar Gabriel Villegas-Torres (Autor/a)

82-104

- [Incidencia diferencial de muérdagos en plantas nativas e introducidas de áreas urbanas y periurbanas en el centro de Guerrero, México](#)

Stephania G. Castellanos, Ernesto A. López-Huicochea, Edson A. Alvarez (Autor/a)

105-119

- [Aproximación metodológica a la comprensión de problemas matemáticos](#)

Ricardo Abreu, Abel Cabrera-Martínez, Juan Carlos Hernández, José Luis Sánchez (Autor/a)

120-133

- [Actividad antirradicalaria y encapsulación de extractos de plantas usadas en la medicina tradicional del estado de Guerrero](#)

Fabiola López, Ma. Elena Moreno, Angélica Catalán, Patricia Álvarez (Autor/a)

134-143

Artículo Académico

- [La comunicación interna como base para fortalecer la cultura organizacional: un estudio de caso de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, Delegación Guerrero](#)

Norma Angélica Sevilla, Claudia Lucero García, Jorge Mario Mendoza (Autor/a)

56-68

Editorial

El presente volumen 19 de Tlamati Sabiduría reúne un conjunto de investigaciones que reflejan la diversidad y el compromiso académico de la Universidad Autónoma de Guerrero y sus instituciones colaboradoras. Los trabajos aquí compilados abordan problemáticas actuales en ciencias naturales, salud, educación matemática, comunicación organizacional y conservación ambiental, ofreciendo aportaciones significativas para la comprensión y solución de desafíos regionales, nacionales y globales.

En el ámbito de las ciencias químicas y biológicas, se presentan estudios sobre la actividad antirradicalaria y encapsulación de extractos de plantas medicinales utilizadas en la medicina tradicional guerrerense, destacando el potencial de especies como *Kalanchoe daigremontiana*, *Eucalyptus globulus* y *Tecoma stans* como fuentes promisorias de antioxidantes naturales para su aplicación en las industrias farmacéutica, alimentaria y cosmética. Asimismo, se analiza la incidencia diferencial de muérdagos en plantas nativas e introducidas de áreas urbanas y periurbanas en el centro de Guerrero, generando información clave para el diseño de estrategias de control y manejo de estas plantas parásitas.

En el ámbito de la salud y la epidemiología, se presenta un modelo matemático de mezclas bayesiano para describir los rebrotes de COVID-19 en el estado de Guerrero, herramienta que permite identificar los picos de contagios, hospitalizaciones y defunciones durante la pandemia, contribuyendo a la toma de decisiones en salud pública.

En el campo de la educación matemática, se ofrece una propuesta metodológica para fortalecer la fase de comprensión de problemas matemáticos, abordando una de las principales dificultades que enfrentan estudiantes y docentes en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

En el ámbito de la comunicación organizacional, se presentan hallazgos sobre la gestión de la comunicación interna y su relación con la cultura organizacional en la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, Delegación Guerrero, proponiendo estrategias para mejorar el trabajo en equipo, la productividad y la integración de los colaboradores.

Finalmente, en el área de conservación ambiental, se abordan temas de gran relevancia como la prevalencia del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* en anfibios del bosque mesófilo de montaña en el sur de México, los desafíos y oportunidades en la protección de tortugas marinas en Guerrero, y las actitudes sociales relacionadas con el consumo de huevo de tortuga marina en la localidad de Llano Real.

Agradecemos a los autores, revisores y editores por su invaluable contribución para hacer posible este volumen. Confiamos en que los lectores encontrarán en estas páginas herramientas para la reflexión, la investigación y la acción en sus respectivos campos de estudio

Doi.

Artículo de investigación

**Actitudes relacionadas con el consumo de huevo de tortuga marina en la
localidad de Llano Real, Guerrero, México: retos y oportunidades**
**Attitudes related to the consumption of sea turtle eggs in the town of Llano Real,
Guerrero, Mexico: challenges and opportunities**
**Atitudes relacionadas ao consumo de ovos de tartaruga marinha na cidade de
Llano Real, Guerrero, México: desafios e oportunidades.**

Himmer Castro-Mondragón¹ ID. 0000-0002-9342-5184

Ana I. Casarrubias-Jaimez^{1*} ID. 0000-0002-9167-8225

¹Facultad de Ecología Marina, Universidad Autónoma de Guerrero. Gran Vía Tropical No. 20, fraccionamiento Las Playas, 39390, Acapulco, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia anajaimez@uagro.mx

Enviado: 03/02/2024

Revisado: 06/03/2024

Aprobado: 08/05/2024

Publicado: 15/06/2024

Resumen

Todas las especies de tortugas marinas son vulnerables a la sobreexplotación a causa de las actividades antropogénicas como la captura incidental, la destrucción del hábitat, la construcción de desarrollos habitacionales costeros y, principalmente, la caza furtiva, recolección, consumo y venta ilegal de sus huevos. Este trabajo se propone conocer las actitudes de la sociedad, relacionadas con el consumo del huevo de tortuga marina en la localidad costera de Llano Real, municipio de Benito Juárez, Guerrero, México, la cual es caracterizada por ser una zona de desove, principalmente de tres especies (*Lepidochelys olivacea*, *Dermochelys coriacea* y *Chelonia mydas*). Durante febrero del año 2023, se aplicaron encuestas cara a cara a pobladores, prestadores de servicios turísticos y turistas. La muestra se conformó por 130 sujetos, de los cuales, 69% se manifiesta en contra del consumo del huevo de tortuga. Sin embargo, 42% refiere consumirlo o haberlo consumido, a pesar de ser una actividad considerada como ilegal. El principal grupo que reporta consumo del huevo de tortuga son los pobladores, seguidos de los turistas. Los turistas que refieren haber consumido huevo de tortuga, mencionan haberlo hecho en restaurantes, o bien a través del ofrecimiento de parte de hueros. El reto principal que enfrenta la conservación y protección de la tortuga marina es la venta y compra ilegal del huevo de tortuga. Por lo tanto, concluimos que, para generar mejoras, se debe fomentar la participación social, promover la integración de dependencias ambientales, así como implementar programas de educación ambiental.

Palabras clave: actitudes sociales, tortuga marina, percepción, recolección ilegal, México.

Abstract

All sea turtle species are vulnerable to overexploitation due to anthropogenic activities such as incidental capture, habitat destruction, construction of coastal housing developments and, mainly, poaching, collection, consumption and illegal sale of their eggs. This work aims to learn about the attitudes of society related to sea turtle egg consumption in the coastal town of Llano Real, municipality of Benito Juárez, Guerrero, Mexico, which is characterized by being a nesting area, mainly of three species (*Lepidochelys olivacea*, *Dermochelys coriacea* and *Chelonia mydas*). During February 2023, face-to-face surveys were administered to local residents, tourism service providers, and tourists. The sample consisted of 130 subjects, of which 69% were against the consumption of turtle eggs. However, 42% reported consuming or having consumed turtle eggs, despite the fact that this activity is considered illegal. The main group reporting turtle egg consumption is local people, followed by tourists. Tourists who report having consumed turtle eggs mention having consumed them in restaurants or through egg sellers. The main challenge facing sea turtle conservation and protection is the illegal sale and purchase of turtle eggs. Therefore, we conclude that, in order to generate improvements, social participation must be encouraged, the integration of environmental agencies must be promoted, and environmental education programs must be implemented.

Keywords: social attitudes, marine turtles, perception, illegal collection, Mexico.

Resumo

Todas as espécies de tartarugas marinhas são vulneráveis à sobre-exploração devido a atividades antropogênicas, como captura acidental, destruição de habitat, desenvolvimento residencial costeiro e, principalmente, caça furtiva, coleta, consumo e venda ilegal de seus ovos. Este estudo visa compreender as atitudes da sociedade em relação ao consumo de ovos de tartaruga marinha na cidade costeira de Llano Real, município de Benito Juárez, Guerrero, México, uma área de nidificação principalmente para três espécies (*Lepidochelys olivacea*, *Dermochelys coriacea* e *Chelonia mydas*). Em fevereiro de 2023, foram realizadas entrevistas presenciais com moradores, prestadores de serviços turísticos e turistas. A amostra foi composta por 130 indivíduos, dos quais 69% expressaram oposição ao consumo de ovos de tartaruga. No entanto, 42% relataram consumir ou ter consumido ovos, apesar dessa atividade ser considerada ilegal. O principal grupo que relata o consumo de ovos de tartaruga são os moradores locais, seguidos pelos turistas. Os turistas que relatam consumir ovos de tartaruga mencionam fazê-lo em restaurantes ou por meio de ofertas de vendedores de ovos. O principal desafio para a conservação e proteção das tartarugas marinhas é a compra e venda ilegal de ovos de tartaruga. Portanto, concluímos que, para gerar melhorias, é necessário incentivar a participação social, promover a integração de órgãos ambientais e implementar programas de educação ambiental.

Palavras-chave: Atitudes sociais, Tartaruga marinha, Percepção, Coleta ilegal, México.

Introducción

Las tortugas marinas (TM) son considerados grandes vertebrados acuáticos ya que desempeñan funciones ecológicas clave en el ambiente marino, participando como consumidoras, presas, anfitrionas de parásitos, competidoras, sustratos para epibiontes y transportadores de nutrientes (Stanford *et al.*, 2020). Además, las TM son vulnerables a la sobreexplotación a causa de algunas características como una prolongada esperanza de vida, madurez tardía, tasas de reproducción lentas y migraciones largas (Lewison *et al.*, 2004; Senko *et al.*, 2011; Stanford *et al.*, 2020).

Adicionalmente, este grupo de ovíparos se ha visto fuertemente amenazado, principalmente por las actividades antropogénicas como la captura incidental, la sobreexplotación, la destrucción del hábitat, la construcción de desarrollos habitacionales costeros, la propagación de especies exóticas, los contaminantes marinos, el cambio climático, entre otros (Mutalib *et al.*, 2013; Bolten *et al.*, 2010; Reid *et al.*, 2019; Senko *et al.*, 2011; Stanford *et al.*, 2020).

Las estrategias para tratar de recuperar y mantener las poblaciones de TM han sido diseñadas con el fin de atender las problemáticas anteriormente mencionadas. Sin embargo, debido

al gran impacto de esta situación, se estima que la implementación de estas estrategias está enfocado a resolver el problema de manera general, lo que podría limitar la atención a las particularidades y necesidades de cada región (Tiburcio-Pintos y Cariño-Olvera, 2017). Por lo tanto, el conocer y entender las actitudes o posturas de los habitantes en relación al consumo de huevo de tortuga podría contribuir a generar soluciones que reduzcan el consumo del mismo (Barrios-Garrido *et al.*, 2019; Senko *et al.*, 2011; Vierros *et al.*, 2020).

Este factor es relevante, porque al crecer las poblaciones costeras se incrementa el consumo de recursos relacionados con las TM, pues se ha identificado que las consideran una fuente de ingresos económicos, por ejemplo, al vender el caparazón, o bien procesarlo y obtener aceite, mismos que son vendidos principalmente a turistas (Gladstone *et al.*, 1999). Además, se ha identificado que algunas culturas del continente asiático, por ejemplo, en Indonesia, utilizan a las TM con fines medicinales (Mardiastuti *et al.*, 2021). Asimismo, las TM han sido objeto de un comercio insostenible, a causa del consumo ilegal de carne y huevos debido a que se considera una importante fuente de proteína (Veríssimo *et al.*, 2020).

Se estima que las principales amenazas a la biodiversidad son consecuencia de los patrones diarios de toma de decisiones de miles de millones de seres humanos en todo el mundo (Schultz, 2011). Por ejemplo, en el caso de las TM, durante el proceso de desove son vulnerables a la depredación, tanto de su carne como de sus huevos (Reavis *et al.*, 2022). Debido a esto, es importante enfocar los esfuerzos de conservación y protección de las TM, en influir sobre el comportamiento y actitudes humanas, para comprender la dinámica de la sociedad, relacionada con los factores que impulsan el consumo de las TM y sus huevos (Veríssimo, 2019; Veríssimo *et al.*, 2020). Por lo anterior, este trabajo se propone como objetivo conocer las actitudes de la localidad costera Llano Real, municipio de Benito Juárez, Guerrero, México, relacionadas con el consumo del huevo de tortuga marina (HTM). Con la finalidad de destacar aquellas áreas que podrían representar una oportunidad para influir en las actitudes sociales, y así enfocar los esfuerzos locales de conservación de estas especies.

Materiales y métodos

Zona de estudio

Este estudio se llevó a cabo en la localidad de Llano Real, municipio de Benito Juárez, Guerrero, México, que en el año 2020 contaba con una población de 424 habitantes, de los cuales 1.65% es indígena. Dicha localidad se encuentra ubicada en la región Costa Grande del estado de Guerrero, a 8.1 km en dirección Noreste, de la localidad de San Jerónimo de Juárez (Figura 1). Esta localidad costera es caracterizada por ser una zona de desove, principalmente de la tortuga golfina (*Lepdochelys olivacea*), tortuga negra (*Chelonia mydas*) y tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) (Castro-Mondragón *et al.*, 2012).

Es importante destacar que dicha localidad está atravesando un proceso de evolución enfocado en el crecimiento de las actividades turísticas, las que, al igual que la pesca, se encuentran entre las

principales actividades socioeconómicas de la localidad. Además, también cabe resaltar que dicho crecimiento ha detonado la visita de turistas.

Debido a que la localidad de Llano Real es una zona de anidación de la TM, se encuentra instalado un campamento Tortuguero que pertenece a la Facultad de Ecología Marina de la Universidad Autónoma de Guerrero, cuya finalidad es desarrollar actividades de protección y conservación de la TM, con fines de investigación.

Colección de datos

Se realizó un estudio transversal en febrero del año 2023, en el que se aplicaron 130 encuestas cara a cara. Los sujetos encuestados fueron pobladores (n=48), turistas (n=50) y prestadores de servicios turísticos (n=32) de la localidad de Llano Real, Benito Juárez, Guerrero.

El instrumento de medición fue una encuesta conformada por preguntas abiertas y cerradas que respondían a distintas variables, como sexo, edad, nivel de escolaridad, tiempo de residencia en la localidad, tipo de informante clave, entre otros. Entre las preguntas cerradas, algunas opciones de respuesta fueron expresadas en escalas de frecuencia, de impacto y de comparación. Esta encuesta fue diseñada con base en la propuesta de Mejías-Balsalobre *et al.* (2021). Para su aplicación, estudiantes de la Licenciatura de Ecología Marina de la Universidad Autónoma de Guerrero fueron capacitados. Los encuestadores leyeron las preguntas, mientras que el participante expresaba las respuestas para que fueran escritas por los encuestadores, debido a que se identificaron personas que no sabían leer ni escribir.

El procedimiento para la aplicación de las encuestas fue a través de recorridos casa por casa, en la comunidad, y en restaurantes ubicados en la franja costera. Los participantes fueron seleccionados mediante un muestreo no probabilístico, por conveniencia.

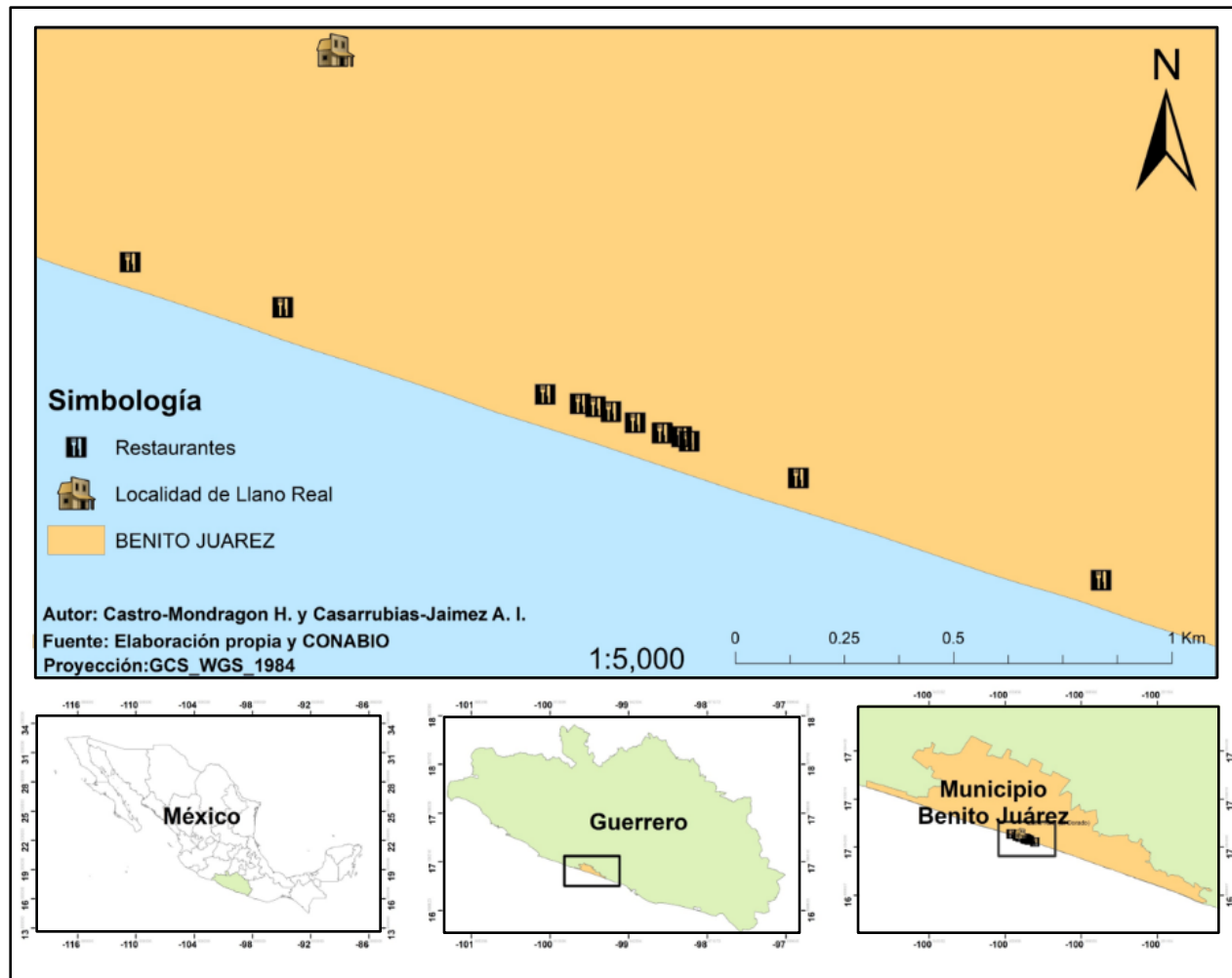


Figura 1. Localización de los restaurantes ubicados en la localidad de Llano Real, municipio de Benito Juárez, Guerrero.

Antes de la aplicación de las encuestas se realizó una prueba piloto bajo las mismas condiciones, que consistió en una única ronda de encuestas a un pequeño grupo de habitantes locales ($n = 6$), seleccionados por conveniencia, para asegurarse de que todas las preguntas fueran adecuadas y comprensibles.

Para procesar las principales actividades económicas (PAE), solo se tomaron en cuenta a pobladores y prestadores de servicios turísticos de la localidad.

Manejo y análisis de datos

Los resultados de las encuestas fueron digitalizados en EpiData18 (Lauritsen y Bruus,

2003) con doble captura y validación de datos, para minimizar los errores de pulsación de teclas (Casarrubias-Jaimez *et al.*, 2020). Los datos fueron exportados al formato *.CSV para su análisis (Herrera-Navarrete *et al.*, 2021). Se realizó análisis de frecuencia simples (Mejías-Balsalobre *et al.*, 2021; Newmark *et al.*, 1993) y estratificado por informante clave.

Consideraciones éticas

Se obtuvo el consentimiento informado de manera verbal, por tres razones: (1) debido a que el consumo de huevos y carne de tortuga está tipificado por las leyes mexicanas como delito, (2) porque no se necesitó realizar alguna intervención

quirúrgica o de diagnóstico, y (3) puesto que algunas personas no saben leer y/o escribir. Explicamos el tipo de información que se solicitó, la finalidad del levantamiento de datos y explicamos que se podían retirar del procedimiento en cualquier momento, si así lo deseaban. La información fue utilizada únicamente para fines de esta investigación y procesada de forma anónima y confidencial. A todos los participantes se les asignó un código identificador único, omitiendo sus nombres (Casarrubias-Jaimes *et al.*, 2020).

Resultados

Frecuencias simples

De los 130 encuestados, el 49% (64/130) fueron varones y 51% (66/130) mujeres. La edad mínima fue de 12 años y la máxima de 83. El nivel de estudios se distribuyó entre licenciatura 21% (27/130), bachillerato 27% (35/130), secundaria 31% (41/130), primaria 18% (23/130) y sin estudios 3% (4/130).

Las PAE de los encuestados fueron el sector turístico 42% (33/78), comerciante 14% (12/78), pescador 10% (8/78), campesino 6% (5/78), trabajador de la construcción 6% (5/78), profesionistas 3% (2/78), estudiante 1% (1/78) y otros 15% (12/78). Entre los prestadores de servicios turísticos, 31% (10/32) son propietarios de restaurantes. Entre los pobladores y prestadores de servicios turísticos, 54% (43/80) eran nacidos en la localidad.

El 17% (21/126) de los encuestados consideran que el consumo de HTM es muy elevado; 24% (30/126) considera que es elevado; 30% (38/126) considera que es medio; 23% (29/126) considera que es bajo; y 6% (8/126), considera que es muy bajo.

Análisis estratificado

Entre la población encuestada, se identificaron pobladores (48/130), prestadores de servicios turísticos (32/130) y turistas (50/130) (Figura 2).

Entre pobladores, prestadores de servicios turísticos y turistas, su postura en relación con el consumo de HTM se explica en la figura 3. Llama la atención que entre los encuestados cuya postura es en contra, 31% (28/89) sí han consumido HTM,

y entre aquellos cuya postura es neutral, 66 % (23/35) sí han consumido HTM (Figura 4).

Un dato interesante es que, en los tres diferentes informantes clave, los que más consumen o han consumido HTM son los pobladores, seguidos de los turistas (Figura 5). Sin embargo, 62% (31/50) de los turistas refieren que, en la localidad, les han ofrecido HTM.

Entre los pobladores que sí consumen o han consumido HTM, 67% (18/27) refiere haberlo obtenido directamente de la playa y 33% (9/27) haberlo comprado a hueveros. Durante la temporada de anidación, 59% (16/27) refieren consumirlo en ocasiones especiales y, 41% (11/27) mencionan consumirlo por su sabor y por su fácil obtención 18% (5/27). Entre los turistas que sí han consumido HTM, 50% (9/18) refieren haberlo comprado directamente a hueveros y, 22% (4/18) haberlo consumido en restaurantes. Durante la temporada de anidación, 65% (11/18) refieren consumirlo en ocasiones especiales y, en su mayoría, 50% (9/18) lo consumen por su sabor y 22% (4/18) por su fácil obtención.

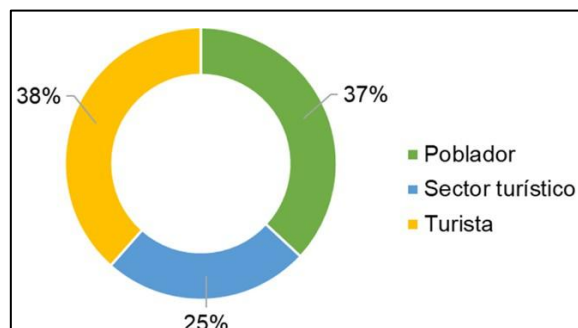


Figura 2. Distribución de pobladores, prestadores de servicios turísticos y turistas.

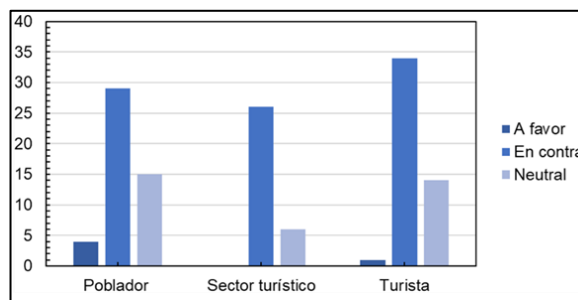


Figura 3. Postura en relación con el consumo de huevo de tortuga entre pobladores, prestadores de servicios turísticos y turistas.

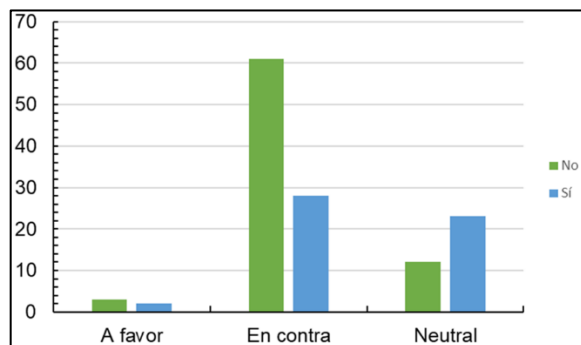


Figura 4. Consumo de huevo de tortuga entre las personas cuya postura es a favor, neutral y en contra.

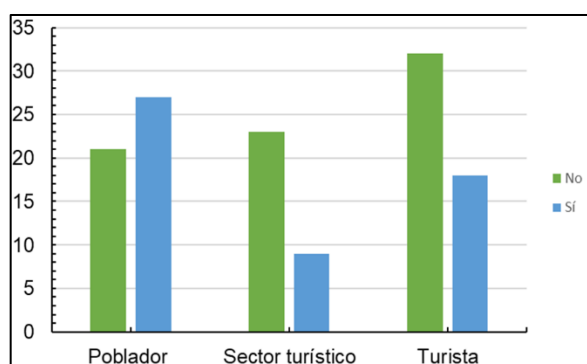


Figura 5. Consumo de huevo de tortuga entre pobladores, prestadores de servicios turísticos y turistas de la localidad de Llano Real.

Es importante mencionar que, aunque no se encuentran entre las principales razones, también se mencionaron como motivos por hábito, por la abundancia, porque se cree que provee energía, como remedio para la resaca y por tradición.

Entre los turistas, 28% (14/50) refieren haber recibido pláticas por parte de algún campamento tortuguero, en la zona de estudio acerca del cuidado, manejo y conservación de la tortuga marina. El 46% (23/50), han vivido la experiencia de liberación de tortugas y 82% (41/50) saben que esta localidad es zona de desove.

Discusión

Es fundamental considerar que los resultados del presente estudio son pioneros para la localidad de Llano Real. Debido al reciente crecimiento del sector turístico en la zona, es importante

considerar que, para el crecimiento económico de los restaurantes y el sector turístico, las actividades de manejo, cuidado y conservación de la TM pueden significar una potencial fuente de ingresos.

En México, la [NOM-059-SEMARNAT-2010](#) tiene por objeto identificar las especies o poblaciones de flora y fauna silvestres en riesgo dentro de la República Mexicana. Esta norma determina la categoría de riesgo: (E), probablemente extinta en el medio salvaje; (P), en peligro de extinción; (A), amenazada, y (Pr), sujetas a protección especial. De acuerdo con esta norma, en el territorio mexicano las especies de TM que se encuentran en peligro de extinción son la tortuga caguama (*Caretta caretta*), tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*), tortuga negra (*Chelonia mydas*), tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*), tortuga lora (*Lepidochelys kempii*) y tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*). Es importante mencionar que el consumo de los productos de las TM está considerado como delito (DOF, 2010).

La mayoría de los participantes fueron pobladores y prestadores de servicios turísticos, tomando en cuenta que esta es la principal actividad socioeconómica de la localidad. En este trabajo, de la misma manera que lo reportaron [Mejías-Balsalobre et al. \(2021\)](#), la percepción del consumo de HTM, no tuvo cambios significativos en función de la opinión de pobladores, prestadores de servicios turísticos y turistas, lo que podría indicar una visión compacta entre sociedad, turistas y prestadores de servicios turísticos.

En México, el consumo del HTM se ha identificado como una de las principales amenazas a la conservación de las TM ([Aguilar-González et al., 2014](#)). Es importante mencionar que, en la localidad 69% (89/129) se expresan en contra de esta actividad. Sin embargo, no es una postura que se vea reflejada en el consumo del HTM, toda vez que entre los que se consideran en postura neutral o en contra, 41% (51/124) ha consumido HTM. Por lo tanto, podemos sugerir que puede ser uno de los principales problemas que enfrente la conservación de estos organismos ([Aguilar-González et al., 2014](#); [Gladstone et al., 1999](#); [Mejías-Balsalobre et al., 2021](#)).

Retos y oportunidades

Discutimos nuestros resultados, con la finalidad de mostrar los principales retos en la localidad de Llano Real relacionados con el consumo de HTM. Con la intención de identificar las principales oportunidades, para contribuir al mejoramiento de estrategias enfocadas a la protección y conservación de las TM.

De acuerdo con lo identificado en este estudio y con lo reportado por [Castro-Mondragón et al. \(2012\)](#), uno de los principales retos que se identificaron en relación con el consumo del HTM, fue la venta ilegal de este recurso, de acuerdo con lo reportado por [Lopes et al. \(2022\)](#) y [Mejías-Balsalobre et al. \(2021\)](#). De acuerdo con lo mencionado por los encuestados, esta actividad es frecuente en la localidad, ya sea desarrollada por los mismos habitantes o personas de pueblos vecinos. Por lo general, dicha actividad se realiza de madrugada, cuando las tortugas ya depositaron sus huevos en la playa, entre 4:00 y 7:00 am, y a las personas dedicadas a esta actividad se le conocen coloquialmente como hueveros.

La venta ilegal, compra y consumo de HTM, se ve potenciada por diferentes actitudes sociales como la tradición, el hábito, e incluso la creencia de que tienen propiedades afrodisíacas (por tal motivo, el consumo es más frecuente entre los hombres) ([Mejías-Balsalobre et al., 2021](#); [Senko et al., 2022](#)). Además, de acuerdo con los resultados, en este estudio se identifica que la obtención del HTM es, principalmente, de la venta ilegal y la compra en restaurantes. De acuerdo con [Barrios-Garrido et al. \(2018\)](#), el consumo de HTM es un hábito arraigado en las diferentes sociedades costeras.

Podemos decir que a pesar de que no toda la sociedad participa en la recolección ilegal de HTM, algunos de los prestadores de servicios turísticos podrían estar participando de manera voluntaria o involuntaria en la venta.

Por lo tanto, sugerimos que las oportunidades para alcanzar mejoras en la protección y conservación de estos organismos deben ir enfocadas en:

(1) Generar actitudes de cambio en la sociedad, mediante incentivos económicos que puedan motivar la participación en las actividades de

protección y conservación de la TM. Estos incentivos podrían ser financiados por medio de programas gubernamentales, por ejemplo, el de empleo temporal.

Consideramos que, ante estos incentivos económicos, los jóvenes y personas desempleadas podrían ser un grupo de la población en el que se puede desarrollar con mayor efectividad las estrategias de protección y conservación de la TM.

(2) Desafortunadamente, no se identifican dependencias ambientales que puedan diseñar estrategias que ayuden a mejorar las condiciones de la TM, en la localidad. Sin embargo, en la región, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado (SEMAREN) es la encargada de buscar la integración entre los elementos sociales, económicos y naturales, que permitan asegurar el óptimo aprovechamiento para lograr la conservación y protección de los recursos naturales del Estado, conformando así una política ambiental integral y participativa para un desarrollo sustentable.

Debido a que el régimen de propiedad de la tierra en la localidad de Llano Real es ejidal, proponemos crear un agrupamiento civil que busque la implementación de acciones dirigidas a la conservación y protección de la TM.

(3) Diseñar e implementar programas de educación ambiental enfocados a explicar la importancia de la TM, cursos-talleres donde se busque compartir saberes relacionados con la importancia del papel biológico de la TM en los ecosistemas marinos y costeros, realizar campañas de concientización donde se explique el daño o daños ecosistémicos que provocan el consumo del huevo de tortuga, además impartir programas o talleres donde se informe de las consecuencias legales de la caza furtiva, venta y consumo de HTM.

Estas estrategias buscarán, principalmente, la participación de pobladores y turistas de la zona (primeros y segundos consumidores de HTM), para provocar una apropiación del conocimiento y comprensión del papel de las TM. Una de las finalidades de estos programas será que el conocimiento adquirido se pueda transmitir de generación en generación, además de tratar de disminuir la venta del HTM.

Conclusiones

Los resultados sugieren que el principal reto que enfrenta la localidad de Llano Real es la recolección ilegal del HTM. Esto, a pesar de que mencionan estar en contra del consumo de HTM, porque saben que amenaza la conservación de la especie.

Entre los informantes clave, los pobladores son el grupo que más consume HTM, seguido de los turistas. Se concluye que esto se pudiera deber a que la localidad de Llano Real atraviesa un proceso de crecimiento turístico, por lo que, se sugiere que, el turismo es una actividad que podría potenciar el consumo de los HTM. Sin embargo, es importante mencionar que todos los turistas a los que les ofrecieron HTM, 100% los consumieron.

Por lo tanto, concluimos que, para generar mejoras en el área de conservación y protección de la TM, las estrategias que busquen mejorar las actitudes de los pobladores deben estar enfocadas a las problemáticas descritas anteriormente.

Referencias

- Aguilar-González, M.E., Luna-González, A., Aguirre, A., Zavala-Norzagaray, A.A., Mundo-Ocampo, M., González-Ocampo, H.A. (2014). Perceptions of fishers to sea turtle bycatch, illegal capture and consumption in the San Ignacio-Navachiste-Macapule lagoon complex, Gulf of California, Mexico. *Integrative Zoology*, 9, 70-84.
<https://doi.org/10.1111/1749-4877.12024>
- Barrios-Garrido, H., Palmar, J., Wildermann, N., Rojas-Cañizales, D., Diedrich, A., Hamann, M. (2018). Marine Turtle Presence in the Traditional Pharmacopoeia, Cosmovision, and Beliefs of Wayuú Indigenous People. *Chelonian Conservation and Biology*, 17, 177-186.
<https://doi.org/10.2744/CCB-1276.1>
- Barrios-Garrido, H., Wildermann, N., Diedrich, A., Hamann, M. (2019). Conflicts and solutions related to marine turtle conservation initiatives in the Caribbean basin: Identifying new challenges. *Ocean & Coastal Management*, 171, 19-27.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.003>
- Bolten, A.B., Crowder, L.B., Dodd, M.G., MacPherson, S.L., Musick, J.A., Schroeder, B.A., Witherington, B.E., Long, K.J., Snover, M.L. (2010). Quantifying multiple threats to endangered species: an example from loggerhead sea turtles. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9, 295-301.
<https://doi.org/10.1890/090126>
- Casarrubias-Jaimes, A.I., Legorreta-Soberanis, J., Sanchez-Gervacio, B.M., Serrano-de Los Santos, F.R., Paredes-Solis, S., Flores-Moreno, M., Andersson, N., Cockcroft, A. (2020). Body image and obesity in children from public primary schools in Acapulco, Mexico: A cross-sectional study. *Boletín Médico del Hospital Infantil de México*, 77, 119-126.
<https://doi.org/10.24875/BMHIM.20000027>
- Castro-Mondragón, H., Flores-Garza, R., García-Ibáñez, S., Flores-Rodríguez, P. (2012). Evaluación de la extracción furtiva de huevos de *Lepidochelys olivacea* en la zona de patrullaje del Centro de Protección y Conservación de la Tortuga Marina (UAEM-UAGro). *Tlamati*, 4(1), 40-46.
- 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.
[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 \(dof.gob.mx\)](https://dof.gob.mx)
- Gladstone, W., Taw, N., Nasr, D., Andersen, I., Cheung, C., Drammeh, H., Krupp, F., Lintner, S. (1999). Sustainable use of renewable resources and conservation in the Red Sea and Gulf of Aden: issues, needs and strategic actions. *Ocean & Coastal Management*, 42, 671-697.
[https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(99)00040-X)
- Herrera-Navarrete, R., Arellano-Wences, H.J., Colín-Cruz, A., Sampedro-Rosas, M.L., Rosas-Acevedo, J.L., Rodríguez-Herrera, A.L. (2021). Thematic and Geographical Trend in Scientific

- Research Applied in Municipal Wastewater Treatment Plants: An overview. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 318.
<https://doi.org/10.1007/s11270-021-05269-y>
- Lauritsen, J.M. Bruus, M. (2003). EpiData (Version 3). A Comprehensive Tool for Validated Entry and Documentation of Data. The EpiData Association, Odense.
- Lewison, R.L., Crowder, L.B., Read, A.J., Freeman, S.A. (2004). Understanding impacts of fisheries bycatch on marine megafauna. *Trends in Ecology & Evolution*, 19, 598-604.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2004.09.004>
- Lopes, L.L., Paulsch, A., Nuno, A. (2022). Global challenges and priorities for interventions addressing illegal harvest, use and trade of marine turtles. *Oryx*, 56, 592-600.
<https://doi.org/10.1017/s0030605320001210>
- Mardiastuti, A., Masy'ud, B., Ginoga, L.N., Sastranegara, H., Sutopo. (2021). Traditional uses of herpetofauna practiced by local people in the island of Sumatra, Indonesia: Implications for conservation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 762, 012003.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/762/1/012003>
- Mejías-Balsalobre, C., Restrepo, J., Borges, G., García, R., Rojas-Cañizales, D., Barrios-Garrido, H., Valverde, R.A. (2021). Local community perceptions of sea turtle egg use in Tortuguero, Costa Rica. *Ocean & Coastal Management*, 201, 105423.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105423>
- Mutalib, A.H.A., Fadzly, N., Foo, R. (2013). Striking a balance between tradition and conservation: General perceptions and awareness level of local citizens regarding turtle conservation efforts based on age factors and gender. *Ocean & Coastal Management*, 78, 56-63.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.03.015>
- Newmark, G.D., Leonard, N.L., Sariko, H.I., Gamassa, D-G. M. (1993). Conservation attitudes of local people living adjacent to five protected areas in Tanzania. *Biological Conservation*, 63, 177-183.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0006-3207\(93\)90507-W](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0006-3207(93)90507-W)
- Reavis, J.L., Rojas-Canizales, D., Mejías-Balsalobre, C., Naranjo, I., Arauz, R., Senko, J.F. (2022). Dynamics of human take and animal predation on sea turtle nests in Northwest Costa Rica. *PeerJ*, 10, e12925.
<https://doi.org/10.7717/peerj.12925>
- Reid, A.J., Carlson, A.K., Creed, I.F., Eliason, E.J., Gell, P.A., Johnson, P.T.J., Kidd, K.A., MacCormack, T.J., Olden, J.D., Ormerod, S.J., Smol, J.P., Taylor, W.W., Tockner, K., Vermaire, J.C., Dudgeon, D., Cooke, S.J. (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, 94, 849-873.
<https://doi.org/10.1111/brv.12480>
- Schultz, P.W. (2011). Conservation means behavior. *Conservation Biology*, 25, 1080-1083.
<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01766.x>
- Senko, J., Schneller, A.J., Solis, J., Ollervides, F., Nichols, W J. (2011). People helping turtles, turtles helping people: Understanding resident attitudes towards sea turtle conservation and opportunities for enhanced community participation in Bahia Magdalena, Mexico. *Ocean & Coastal Management*, 54, 148-157.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2010.10.030>
- Senko, J.F., Burgher, K.M., Mancha-Cisneros, M.M., Godley, B.J., Kinan-Kelly, I., Fox, T., Humber, F., Koch, V., Smith, A.T., Wallace, B.P. (2022). Global patterns of illegal marine turtle exploitation. *Global Change Biology*, 28, 6509-6523.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.16378>
- Stanford, C.B., Iverson, J.B., Rhodin, A.G.J., van Dijk, P.P., Mittermeier, R.A., Kuchling, G., Berry, K.H., Bertolero, A., Bjorndal, K.A., Blanck, T.E.G., Buhlmann, K.A., Burke, R.L., Congdon, J.D., Diagne, T., Edwards, T., Eisemberg, C.C., Ennen, J.R., Forero-Medina, G., Frankel, M., Fritz, U., Gallego-García, N., Georges, A., Gibbons, J.W., Gong, S., Goode, E.V., Shi, H.T., Hoang, H., Hofmeyr, M.D., Horne, B.D., Hudson, R., Juvik, J.O., Kiester, R.A., Koval, P., Le, M., Lindeman, P.V., Lovich,

- J.E., Luiselli, L., McCormack, T.E.M., Meyer, G.A., Paez, V.P., Platt, K., Platt, S.G., Pritchard, P.C.H., Quinn, H.R., Roosenburg, W.M., Seminoff, J.A., Shaffer, H.B., Spencer, R., Van Dyke, J.U., Vogt, R.C., Walde, A.D. (2020). Turtles and Tortoises Are in Trouble. *Current Biology*, 30, R721-R735.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.04.088>
- Tiburcio-Pintos, G., Cariño-Olvera, M.M. (2017). Esfuerzos colectivos para la conservación de las tortugas marinas en el Golfo de California. *Letras Verdes*, 22, 7-26.
<https://doi.org/10.17141/letrasverdes.22.2017.2697>
- Veríssimo, D. (2019). The Past, Present, and Future of Using Social Marketing to Conserve Biodiversity. *Social Marketing Quarterly*, 25, 3-8.
<https://doi.org/10.1177/1524500419825545>
- Veríssimo, D., Vieira, S., Monteiro, D., Hancock, J., Nuno, A. (2020). Audience research as a cornerstone of demand management interventions for illegal wildlife products: Demarketing sea turtle meat and eggs. *Conservation Science and Practice*, 2, E164.
<https://doi.org/10.1111/csp2.164>
- Vierros, M.K., Harrison, A.-L., Sloat, M.R., Ortuño-Crespo, G., Moore, J.W., Dunn, D.C., Ota, Y., Cisneros-Montemayor, A.M., Shillinger, G.L., Watson, T.K., Govan, H. (2020). Considering Indigenous Peoples and local communities in governance of the global ocean commons. *Marine Policy*, 119.
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104039>

Doi.

Artículo de investigación

Importancia de los minerales y la biomineralización en la evolución de los metazoarios

Importance of minerals and biomineralization in the evolution of metazoans

Importância dos minerais e da biomineralização na evolução dos metazoários

Ma Catalina Gómez-Espinosa^{1*} ID. 0000-0003-2074-6523

María Colín-García² ID. 0000-0002-9193-1761

¹Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero. Ex-Hacienda de San Juan Bautista S/N, 40323, Taxco el Viejo, Guerrero, México

²Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito exterior Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, 40210, Ciudad de México, México.

*Autor de correspondencia 17702@uagro.mx

Enviado: 18/02/2024

Revisado: 13/03/2024

Aprobado: 17/05/2024

Publicado: 21/06/2024

Resumen

Los organismos que precipitan minerales se llaman biomineralizadores. La biomineralización es el proceso bioquímico a través del cual se forma el esqueleto de los animales, que es la estructura que da protección o soporte a los metazoarios. Los principales biominerales son el carbonato de calcio, la hidroxiapatita y la sílice. En el registro fósil, la biomineralización aparece en el período Ediacarano (hace 550 Ma) y para el Ordovícico (485 Ma) ya estaba bien establecido. La evolución muestra que fue un proceso convergente o paralelo que permitió la radiación de todos los Phyla. La biomineralización es clave para entender el pasado y presente de la biota. En esta contribución se hace una breve revisión de la biomineralización en los animales y su registro fósil.

Palabras clave: Bioquímica, Esqueleto, Minerales, Metazoa, Evolución.

Abstract

Organisms that precipitate minerals are called biomineralizers. Biomineralization is the biochemical process by which the skeleton of animals is formed, which is the structure that gives protection or support to metazoans. The main biominerals are calcium carbonate, hydroxylapatite, and silica. In the fossil record, biomineralization appears in the Ediacaran period (550 Ma) and for the Ordovician (485 Ma) it was already well established. Evolution shows that it was a convergent or parallel process that helped the radiation of all Phyla. Biomineralization is a key for the understanding of the past and present of the biota. In this

contribution it is performed a brief review about biomineralization in the animals and their fossil record.

Keywords: Biochemistry, Skeleton, Minerals, Metazoa, Evolution.

Resumo

Organismos que precipitam minerais são chamados de biomineralizadores. A biomineralização é o processo bioquímico pelo qual o esqueleto dos animais é formado, fornecendo proteção e suporte aos metazoários. Os principais biominerais são o carbonato de cálcio, a hidroxiapatita e a sílica. No registro fóssil, a biomineralização aparece no período Ediacarano (550 milhões de anos atrás) e já estava bem estabelecida no Ordoviciano (485 milhões de anos atrás). A evolução mostra que foi um processo convergente ou paralelo que permitiu a radiação de todos os filos. A biomineralização é fundamental para a compreensão do passado e do presente da biota. Esta contribuição apresenta uma breve revisão da biomineralização em animais e seu registro fóssil.

Palavras-chave: Bioquímica, Esqueleto, Minerais, Metazoários, Evolução.

Introducción

Nuestro planeta es un sistema muy complejo en el que destaca la presencia de la vida. La litosfera (capa superficial sólida de la tierra), la hidrosfera (capa de agua que rodea a la tierra), y la atmósfera (capa gaseosa que envuelve a la tierra) interactúan, dando como resultado que la vida se adapte a diversos ambientes favoreciendo que las especies se diversifiquen. Los factores físico-químicos en los ambientes son muy distintos e incluyen variables como la temperatura, presión, salinidad, alcalinidad, abundancia o escasez de recursos, entre otros. El conjunto de todas las especies que pueblan el planeta y sus interacciones constituye la biosfera; de hecho, la biosfera es un componente principal de la Tierra, que influye y es influenciado por todas las esferas mencionadas (Martin y Johnson, 2012). Pero, para poder diversificarse y persistir en el tiempo, los seres vivos han tenido que desarrollar estrategias muy particulares, una de ellas es el proceso conocido como biomineralización, es decir la formación biótica de los minerales (Pérez-Huerta *et al.*, 2018).

Particularmente, los estudios sobre el origen del proceso de biomineralización en los diferentes grupos de metazoarios, se realizan tratando de encontrar un consenso entre la filogenia, el registro fósil, el tiempo geológico y las características moleculares. En este trabajo, nos enfocaremos en el proceso de biomineralización dentro del registro fósil.

¿Qué son los minerales y cómo influyen en la vida?

Los minerales se pueden definir como compuestos químicos cristalinos sólidos formados por procesos geológicos. Estos cristales son fundamentales en la Tierra, pues la corteza está compuesta por mezclas de minerales que constituyen a las rocas, y ésta a su vez forman la litosfera (Almodóvar, 2013). La composición mineralógica de las rocas es muy importante pues determina de manera directa o indirecta el establecimiento y desarrollo de las comunidades biológicas. De hecho, desde la época grecorromana los minerales llamaron la atención y Teofrasto en su obra “*De Lapidibus*” describió por primera vez varios tipos de menas y minerales y trató de clasificarlos.

Algunos seres vivos a través de diversos procesos evolutivos, han logrado utilizar a las rocas, intemperizando a los minerales, y aprovechando los elementos que son liberados para producir energía a partir de sustratos inorgánicos, estos organismos son llamados litótrofos (del griego *lithos* roca y *trophe* nutrición), (Fuhrmann, 2021). Los organismos litótrofos (Figura 1) son principalmente bacterias, arqueas y hongos, que constituyen la base de muchos sistemas naturales; sin estos organismos pioneros, el resto de la biota no sería capaz de establecerse, por lo que, aunque invisibles a simple vista, de ellos dependen el resto de los seres vivos (Franklin *et al.*, 2000).



Figura 1. Organismos litótrofos: líquenes sobre una roca en Ayawilca, Departamento de Pasco, Perú. Fotografía Antoni Camprubí Cano.

¿Qué es la biomineralización?

Los minerales que son formados por procesos terrestres relacionados con la litósfera y el ciclo de las rocas son llamados abióticos. Sin embargo, en diferentes grupos biológicos, se ha desarrollado la capacidad de precipitar y formar minerales de origen biótico, este proceso es conocido como biomineralización (Weiner y Dove, 2003). Si bien no todos los organismos pueden formar biominerales, este mecanismo está ampliamente extendido entre los seres vivos. Los esqueletos biomineralizados se encuentran en los animales pluricelulares, formalmente llamados metazoarios, en una impresionante variedad de tipos de organización, formas, planes y con diferentes funciones en su cuerpo (Murdock y Donoghue, 2011). Existen más de 60 especies distintas de biominerales conocidos en 55 Phyla de organismos (González Muñoz *et al.*, 1996); los más relevantes y abundantes son los biominerales de calcio, que se encuentran en varios grupos biológicos y representan aproximadamente un

50% de todos los biominerales conocidos (Soto-Bubert, 2003), mientras que los fosfatos representan cerca del 25% (Weiner y Dove, 2003).

Estructuralmente los biominerales son 80% cristalinos y 20% amorfos (Soto-Bubert, 2003), a nivel de composición están formados por una parte inorgánica y otra orgánica (Gilbert *et al.*, 2022); el contenido orgánico varía dependiendo de la forma, del tipo y funcionalidad de cada estructura biomineralizada (Pérez-Huerta *et al.*, 2018). Además, los biominerales tienen propiedades particulares (como la forma, el tamaño, la cristalinidad, la traza isotópica y elemental) que los hace muy diferentes a las de su contraparte inorgánica (Weiner y Dove, 2003).

Tipos de biomineralización

Los procesos de biomineralización se dividen en dos grandes grupos que difieren en el grado de control que tienen los organismos sobre el proceso (Weiner y Dove, 2003).

Mineralización biológicamente inducida (MBI)

En este tipo, la precipitación de los minerales es secundaria y se produce como resultado de la interacción entre la actividad biológica y el ambiente (Figura 2A).

Mineralización biológicamente controlada (MBC)

En este tipo, el organismo utiliza su maquinaria celular para dirigir el sitio, el crecimiento y la morfología final del mineral que será depositado (Figura 2B), (Benzerara, 2011). La biomineralización biológicamente controlada en general ocurre en ambientes aislados, en muchos casos dentro de vesículas. Particularmente, la formación de esqueletos en los animales se da a través del proceso de biomineralización biológicamente controlada.

La biomineralización y el esqueleto de los organismos

Uno de los fenómenos que más ha llamado la atención de los químicos, paleontólogos y biólogos evolutivos, es el proceso de precipitación de biominerales por parte de los

seres vivos para formar su esqueleto (Knoll, 2003). En gran parte, este proceso lento y paulatino, que se desarrolló a lo largo de unos 40 millones de años (Ma), (Pérez-Huerta *et al.*, 2018), permitió la evolución de los animales y tuvo su máxima expresión durante la llamada radiación cámbrica (hace unos 541 Ma).

Los animales con esqueleto son muy diversos no sólo en forma sino también en sus diferentes funciones ecológicas. Los esqueletos de los animales están formados por varios minerales, algunos están compuestos por carbonato de calcio, como es el caso de los corales, braquiópodos y moluscos; otros están formados por sílice, como las espículas de esponjas; y otros más tienen como componente principal a los minerales fosfatados, en este caso los esqueletos de los vertebrados (Murdock, 2020), por ejemplo, los dientes de los tiburones.

La formación de partes duras provee a los seres vivos de ventajas adaptativas, mientras que los esqueletos externos protegen a los organismos del medio y de los depredadores, los esqueletos internos brindan soporte a los tejidos y, por tanto, permiten un aumento en el tamaño de los cuerpos (Knoll, 2003; Murdock y Donoghue, 2011).

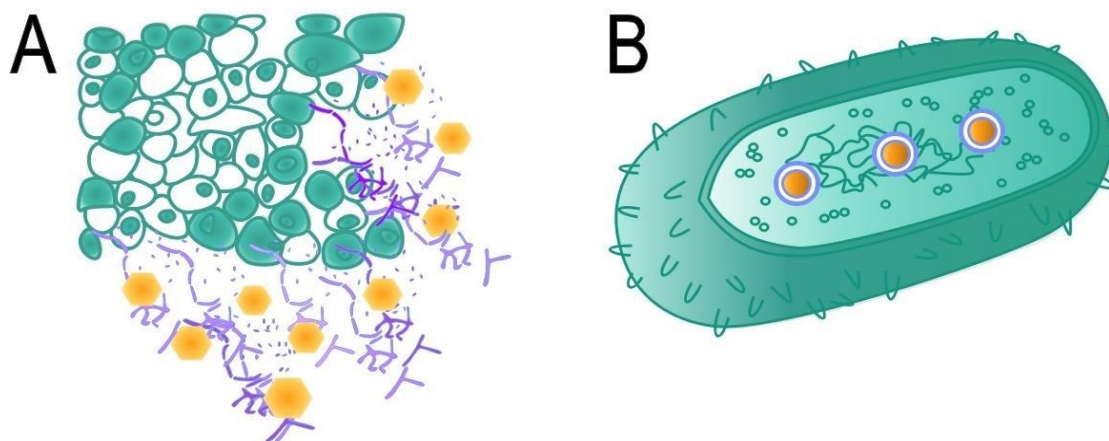


Figura 2. Tipos de biomineralización biológica: A) Mineralización Biológicamente Inducida. La biomineralización ocurre por la interacción de los organismos y el ambiente; en este tipo de mineralización los organismos (en turquesa) liberan al medio precursores químicos (en morado) que al interactuar con el medio precipitan minerales (hexágonos), B) Mineralización Biológicamente Controlada. Los minerales (esferas naranjas) se forman en ambientes controlados, generalmente al interior de vesículas, los organismos controlan el tamaño, tipo de mineral y el sitio de depósito (basado en Cosmidis y Benzerara, 2022).

En el registro fósil, los restos duros son los que presentan mayor probabilidad de preservarse, y gracias a ellos es que ha podido estudiarse la vida y su evolución (Paul, 2019). En este sentido, no sólo los esqueletos son importantes, sino que los minerales biogénicos y su preservación, también permite reconstruir las condiciones que prevalecieron en los ambientes antiguos. A menudo, los biominerales contienen firmas geoquímicas, que son moléculas que reflejan las condiciones en que vivía el organismo. Por ejemplo, en los biominerales pueden preservarse moléculas de agua, y a partir de ellas se puede determinar la salinidad, temperatura, alcalinidad y productividad de un ambiente particular en el pasado geológico (Katz *et al.* 2010). Los biominerales, además, permiten entender la evolución de los distintos tipos de metabolismo y la fisiología de diferentes grupos (Murdock y Donoghue, 2011).

Biominerales más comunes

La diferencia entre los minerales que forman los esqueletos de los animales permite saber que los tipos de biomineralización se desarrollaron de manera independiente durante su evolución, es decir, que no surgieron una sola vez a partir de un solo ancestro, sino que los metazoarios, que en un principio poseían únicamente tejidos blandos evolucionaron a través de diferentes procesos para formar partes duras (Murdock y Donoghue, 2011; Murdock, 2020; Gilbert *et al.* 2022).

La precipitación de biominerales, en particular en la MBC requiere de la participación activa de las células de los organismos. Además, se han reconocido sistemas moleculares que son necesarios para que ocurra la biomineralización, dentro de los que se encuentran proteínas y polisacáridos (Shastri, 2015).

Los carbonatos de calcio, silicatos y fosfatos son los biominerales más comunes dentro de los metazoarios, otros biominerales que se presentan son haluros, sulfatos, sulfuros, óxidos de hierro y de manganeso, citratos y oxalatos entre otros (González Muñoz *et al.*, 1996).

La composición química de los biominerales más frecuentes en el reino animal se describe brevemente a continuación.

Carbonato biogénico

La calcita y aragonita (CaCO_3) son los dos polimorfos en que se presenta el carbonato de calcio en los organismos (Shastri, 2015). La carbonatogénesis o formación del carbonato orgánico o biogénico, es la precipitación del carbonato de calcio por medio de actividades fisiológicas, asociado a ambientes alcalinos donde predomina el carbono inorgánico diluido y hay un pH alto (Lee, 2003).

La aragonita es una forma termodinámicamente inestable a altas temperaturas, por lo que, a lo largo del tiempo decaerá en calcita. Los precursores de estos carbonatos son los carbonatos de calcio amorfos y constituyen el principal mineral formador de endo y exoesqueletos en el reino animal. Una gran variedad de organismos presenta estos biominerales, por ejemplo, los corales, braquiópodos, moluscos y equinodermos (Shastri, 2015).

Sílice biogénica

La biosílice o sílice biogénica (SiO_2), es el segundo compuesto mineral más común en la naturaleza, puesto que forma parte de los animales, vegetales (como los equisetos), algas (diatomeas) y otros microorganismos (radiolarios y silicoflagelados). En los metazoarios la sílice es parte de las espículas de las esponjas. Tanto los factores como las moléculas biológicas involucradas en su fabricación aún no son comprendidas (Shastri, 2015).

Hidroxiapatita

Es un fosfato de calcio natural formado por moléculas de calcio, fósforo e hidrógeno ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$), (García-Garduño y Reyes-Gasca, 2006), siendo importante la presencia de colágeno que sirve como molde para permitir que se desarrolle un nuevo cristal de hidroxiapatita y se forme el esqueleto (Shastri, 2015). Es la fase mineral de la que está formado el esqueleto de los vertebrados en un 60 a 70% (García-Garduño y Reyes-Gasca, 2006), y si la hidroxiapatita es deficiente de calcio forma la dentina y el esmalte de los dientes (Cuny *et al.*, 2017).

La biomineralización y el registro fósil

Los paleontólogos se enfocan en la revisión de las partes duras conservadas, pero en algunos fósiles, también puede ser estudiada la fase orgánica, lo que permite hacer estudios de paleontología molecular, investigando los patrones moleculares a través de la aplicación de técnicas como la espectroscopía RAMAN donde se usa la interacción de la luz con la materia para caracterizar la composición de un material, se puede estudiar el tipo de biominerales en los fósiles.

Precámbrico

Las primeras partes duras biomineralizadas documentadas corresponden a placas fosfatadas de probables protistas (organismos unicelulares sin núcleo) formadas bajo un control biológico activo que datan de hace aproximadamente 810 Ma (Wood, 2018).

Existen reportes notables de organismos con posibles tejidos mineralizados que datan de la Era Precámbrica (Ediacarano tardío, hace 550 Ma). Estos organismos tienen un tamaño variable que va desde 1 mm hasta 1 m (Wood *et al.*, 2017). Algunos autores los consideran como organismos problemáticos (Gilbert *et al.*, 2022), mientras que otros estiman que corresponden a animales relacionados con las esponjas, corales o poliquetos (Murdock, 2020).

En estos organismos el esqueleto consistía en un tubo de carbonato de calcio en forma de aragonita; los géneros más reconocidos son *Sinotubulites* y *Cloudina* (Figura 3A) que fueron descubiertos en el año de 1972 (Murdock y Donoghue, 2011). En la actualidad, se han identificado varios géneros del mismo período (Ediacarano), que se han denominado de manera general como cloudinidos, y de los que se tiene la certeza que ya poseían un esqueleto mineralizado (Murdock, 2020).

Los exoesqueletos de los organismos ediacarianos se caracterizaban por poseer paredes muy delgadas (entre 40 a 90 μm), con una estructura simple y sin una orientación cristalo-gráfica. Aunque algunos esqueletos presentan calcita organizada en fibras (fibrosa) o gránulos (microgranular), se cree que esto fue un efecto

secundario debido al proceso de fosilización, pues la organización de los cristales no es jerárquica, es decir no tiene un orden como el que siguen los minerales de naturaleza orgánica (Wood *et al.*, 2017).

Durante el Ediacarano tardío aparecieron las formas llamadas “pequeñas faunas con concha” (*small shelly faunas*). Estos fósiles son de unos cuantos milímetros, originalmente estaban formados por aragonita y algunos presentan una forma triradial-tubular. Aunque no se conoce su afinidad taxonómica, posiblemente están relacionados con los corales (Murdock, 2020).

Los cambios en el desarrollo evolutivo del tipo de esqueleto que desarrollaron los organismos durante la Era Precámbrica (Ediacarano), sugieren que la biomineralización fue un proceso no selectivo, es decir que solo respondió a la química del agua oceánica y a los cambios ambientales; basándose en el hecho de que el registro de esqueletos mineralizados durante este periodo está restringido a ambientes costeros en plataformas carbonatadas, con aguas saturadas en carbonato de calcio (Gilbert *et al.*, 2022).

Transición Precámbrico-Paleozoico

Se considera que, en la transición del Precámbrico al Paleozoico, la depredación fue el proceso de presión que impulsó la formación de un esqueleto mineralizado como respuesta defensiva (Murdock, 2020). Esto último se infiere por el aumento de depredadores al que le sigue el surgimiento de diferentes tipos de minerales que forman los esqueletos los cuales incluyen carbonato de calcio, sílice, fosfato y partículas aglutinantes.

Durante esta transición también se ha reportado un cambio en la química marina, de océanos aragoníticos a océanos calcíticos, y se ha reconocido que la biomineralización esquelética siguió el mismo patrón que la química oceánica (Gilbert *et al.*, 2022). Esto es importante porque los cambios químicos ambientales no se ven reflejados posteriormente en los procesos de biomineralización y es a partir del Paleozoico que la biomineralización empezó a estar controlada por procesos evolutivos, genéticos y moleculares (Murdock y Donoghue, 2011).

Paleozoico (Cámbrico)

Durante el Cámbrico, primer periodo de la era Paleozoica, hace 541 a 485 Ma, inició la diversidad de minerales en la biomineralización y aparecieron nuevos organismos con esqueleto aragoníticos, como los coleoloida, y surgieron también los primeros organismos con esqueleto fosfatado, como los hyolithemintida y byroniida. Todos estos grupos eran formas tubulares, con un posible parentesco con los corales (Murdock, 2020). También durante el Cámbrico, aparecen los organismos llamados coralimorfos, que son semejantes a corales, pero corresponden a diferentes grupos biológicos. Se sugiere que en algunos de los coralimorfos el esqueleto pudo estar formado por carbonato de calcio en forma de calcita, mientras que en otros estuvo formado por carbonato de calcio en forma de aragonita (Murdock, 2020). En este periodo también aparecen los conuláridos (Figura 3B) que tenían un esqueleto fosfatado.

Los esqueletos mineralizados de algunos metazoarios. Aunque no hay una hipótesis única al respecto, sí se estima que la biomineralización en los metazoarios ancestrales tienen un único origen, y que posteriormente la evolución del esqueleto mineralizado de las esponjas y los corales se desarrolló de manera independiente al

de los briozoarios, anélidos, braquiópodos y moluscos. Aunque es una pregunta constante, aún no se ha llegado a un acuerdo sobre cuál fue el organismo con esqueleto mineralizado que pudiera considerarse el ancestro común de todos estos grupos. Sin embargo, se han propuesto como posibles ancestros, a *Namacalathus* (Precámbrico, Ediacarano) y *Protohertzina* (Paleozoico, Cámbrico), (Figura 3C), (Murdock y Donoghue, 2011).

Porifera. Actualmente las esponjas son los animales de organización más simple, el origen de su esqueleto es difícil de establecer en el registro fósil, y aunque durante el Cámbrico ya existían tres clases de esponjas aún no se ha comprendido cómo adquirieron sus espículas silíceas. En el registro fósil del Cámbrico medio (hace 505 Ma) de Burgess Shale en Canadá hay esponjas que poseían espículas de dos tipos de minerales: sílice y calcio (Botting y Butterfield, 2005).

Los procesos evolutivos permitieron que las esponjas actuales posean exclusivamente espículas de un solo mineral, por un lado, se encuentran las esponjas con espículas silíceas (demoesponjas y hexactinélidas) y por el otro, las esponjas con espículas de carbonato de calcio (esponjas calcáreas o calciesponjas), (Murdock, 2020).

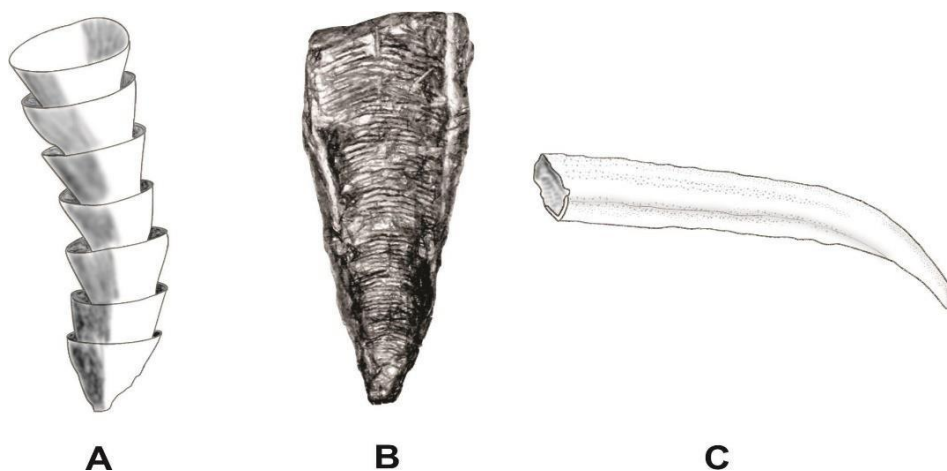


Figura 3. Primeros organismos biomineralizadores A) *Cloudina*, B) Conulárido y C) *Protohertzina*.

Brachiopoda. El origen de la biomineralización en los braquiópodos se remonta al Cámbrico, el esqueleto mineralizado de este grupo tiene orígenes independientes y posiblemente surgió a partir de ancestros fosfatados que, posteriormente formaron un esqueleto de calcita baja en magnesio (Figura 4A).

Mollusca. Los moluscos son posiblemente los metazoos bilaterales con el registro fósil más antiguo (Martí Mus *et al.*, 2008). Aunque las relaciones evolutivas entre sus diferentes clases no son claras, se tienen fósiles de al menos cinco de sus clases a finales del Cámbrico (Fortuniano), hace 535 Ma. Estos fósiles presentan un esqueleto biomineralizado de aragonita, calcita (alta o baja en magnesio), e incluso una forma desconocida en la actualidad, que es una mezcla de carbonatos.

Los primeros moluscos no tienen una afinidad biológica definida con los grupos actuales, los grupos ancestrales presentaban un arreglo fibroso-lamelar de los carbonatos, que evolucionó a una textura foliar y prismática. Y de una manera independiente desarrollaron una capa nacarada a finales del periodo Ordovícico (hace 445 Ma aproximadamente) (Figura 4B-C). Es durante este tiempo cuando se sugiere que el proceso de biomineralización ocurrió de manera divergente, originándose a partir de una estructura aragonítica de estructura fibrosa. Los primeros moluscos están relacionados con las actuales clases

Monoplacofora, Gastropoda, Bivalvia y Scaphopoda (Wanninger y Wollesen, 2018).

Artrópodos. La biomineralización del exoesqueleto en los artrópodos, particularmente los crustáceos, cuenta con un amplio registro fósil, y se caracteriza por el crecimiento de calcita baja en magnesio y apatita (Maas *et al.*, 2006). Sin embargo, el esqueleto fosfatado en este grupo apareció rápida y abruptamente en los trilobites durante el Cámbrico medio (Dalingwater *et al.*, 1991). Al igual que en otros organismos se sugiere que hubo un desarrollo autónomo del proceso de biomineralización en varios grupos de artrópodos que favoreció el desarrollo de los esqueletos calcáreos y fosfatados, respectivamente (Murdock, 2020).

Deuterostomados. Los deuterostomados son el grupo biológico en el que se forma primero el ano y después la boca, a estos pertenecen los equinodermos y los cordados, dentro de estos últimos se encuentran los vertebrados (Marlétaz, 2019). Mientras que los equinodermos poseen un endoesqueleto calcáreo, los vertebrados poseen un esqueleto fosfatado. Se asume que en ambos grupos se desarrolló la biomineralización de manera independiente (Murdock, 2020).

Los equinodermos ancestrales aparecieron a principios del Cámbrico (hace unos 525 millones de años), mientras que los grupos modernos aparecieron hasta el Ordovícico temprano (hace unos 505 millones de años), (Zamora y Raman,

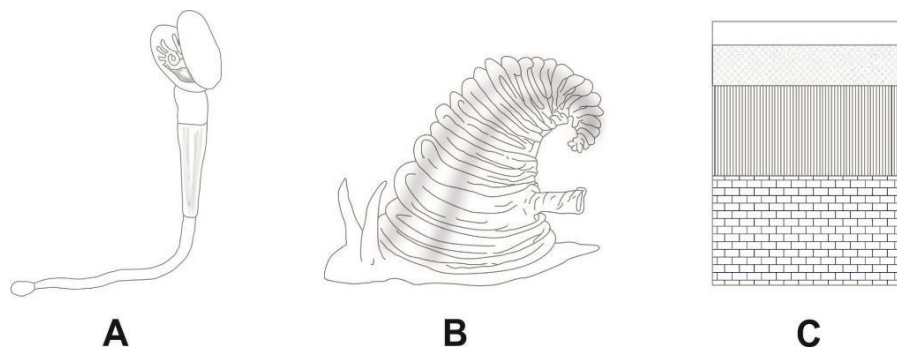


Figura 4. A) Reconstrucción de *Yuganotheca* género extinto que muestra rasgos similares a la de los braquiópodos, B) Reconstrucción de *Yochelcionella* un género extinto del grupo basal de los moluscos, C) Estructura simplificada de la biomineralización de las conchas de los moluscos: 1) Capa de calcita prismática 2) capa fibrosa-lamelar 3) Capa de nácar.

2014). La calcita porosa (estereoma) es un rasgo característico del esqueleto de los equinodermos. Sin embargo, en estadios larvarios este esqueleto está poco desarrollado, lo cual originó la sugerencia de una posible evolución independiente del endoesqueleto. En la actualidad la hipótesis más aceptada sugiere que hay una reducción en el endoesqueleto larvario de los asteroideos (estrellas de mar), en lugar de una evolución independiente con los equinoideos (erizos, galletas y panquecitos de mar), (Murdock, 2020).

En tanto que, para los vertebrados, se propone que el colágeno sirvió como base para el proceso de mineralización, y posteriormente hubo una diversificación plesiomórfica (es decir una condición ancestral de la que surgen nuevos caracteres) de los tejidos esqueléticos. Los conodontos son la primera evidencia fósil de los vertebrados, aparecen en el Cámbrico Superior (Paleozoico) y persisten hasta el Triásico (Mesozoico). Los conodontos fueron organismos de cuerpo blando con un aparato de alimentación distintivo formado por elementos fosfatados,

semejantes a dientes, están divididos taxonómicamente en para y euconodontos, basados en la organización del número de capas de tejido que presentan. Los paraconodontos tienen una sola capa mineralizada, similar a la dentina; mientras que, los euconodontos presentan dos capas de crecimiento sincrónico, una de ellas similar al esmalte (Sweet y Donoghue, 2001).

Otros grupos. Hay otros grupos con esqueleto biomineralizado de los que se tiene poca información de su registro fósil y una taxonomía actual complicada. Estos factores dificultan el entendimiento de su genómica y el origen de su biomineralización, tal es el caso de los anélidos y onicóforos, por mencionar los principales. Basándose en la evidencia filogenética se sugiere entonces, que el proceso de biomineralización apareció en el registro fósil mucho después de que los diferentes Phyla radiaran. Ello implica que, por un lado, no hay una ancestría común para este proceso y, por el otro, que cada grupo por separado desarrolló estrategias diferentes de

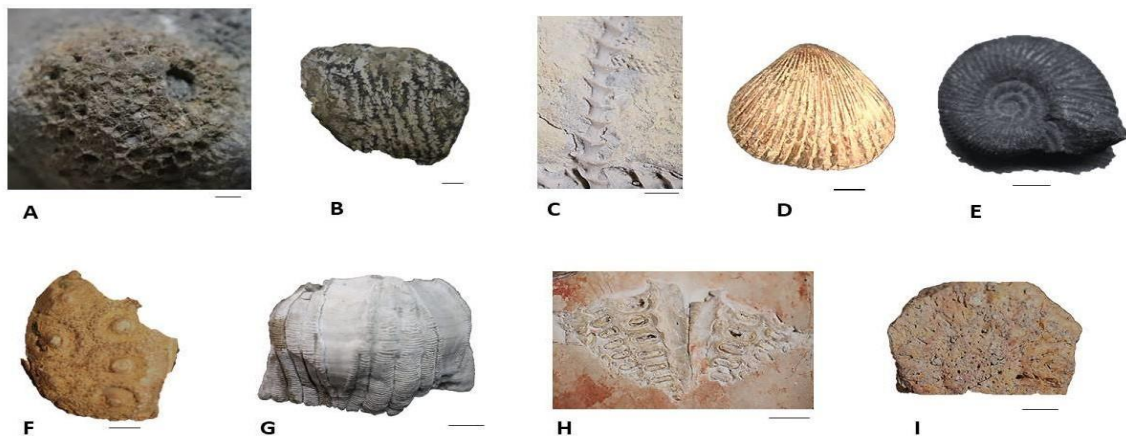


Figura 5. A) Esponja pérmica de la Formación Patlanoaya en el Estado de Puebla B) Coral cretácico de la Formación San Juan Raya en el Estado de Puebla C) Briozoario pérmico de la Formación Patlanoaya en el Estado de Puebla D) Braquiópodo pérmico de la Formación Olinalá en el Estado de Guerrero E) Molusco cefalópodo pérmico de la Formación Olinalá en el Estado de Guerrero F) Artrópodo cirripedio pliocénico de la Formación Punta Maldonado en el Estado de Guerrero G) Equinodermo regular cretácico de la Formación San Juan Raya en el Estado de Puebla H) Dientes de peces cretácicos de la Formación Tlayúa en el Estado de Puebla I) Placa de gliptodonte pleistocénico de El Platanal en el Estado de Guerrero. Los ejemplares ilustrados se encuentran resguardados en la Colección de Paleontología de la Escuela Superior de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Guerrero. Escala 5 mm.

mineralización que son evidencia de una evolución paralela o convergente (Wood *et al.*, 2017; Gilbert *et al.*, 2022).

En la Figura 5 se muestran en orden filogenético los principales grupos de metazoarios que llevan a cabo el proceso de biomineralización: porífera o esponjas con espículas silíceas (Figura 5A); cnidarios (medusas y corales), (Figura 5B), briozoarios (Figura 5C), braquiópodos (Figura 5D) y moluscos (Figura 5D) con exoesqueletos calcáreos; artrópodos (Figura 5F), y deuterostomados del tipo de los equinodermos (Figura 5G) y vertebrados (Figura 5H-I) con esqueletos fosfatados.

Conclusiones

Los minerales son muy importantes para la biosfera, pues constituyen el medio en el que se asienta la vida, y algunos organismos han desarrollado la capacidad para intemperizar los minerales y obtener energía de ellos. Además, porque a través de diversos procesos evolutivos, paralelos y convergentes en los diferentes grupos de metazoarios, se ha desarrollado el mecanismo de biomineralización.

El registro fósil es fundamental para entender la biomineralización en los animales, y de acuerdo con este registro puede inferirse que la biomineralización surgió durante la Era Precámbrica en el período Ediacarano, siendo dependiente de la química del agua, para posteriormente especializarse durante la Era Paleozoica en el período Cámbrico y evolucionar como una adaptación contra la depredación.

Los primeros organismos biomineralizadores durante el Ediacarano incorporaron carbonato de calcio a su estructura, y continuaron su diversificación a través del Cámbrico, incorporando minerales como la sílice y los fosfatos, siguiendo su desarrollo hasta el Ordovícico temprano.

Siendo la biomineralización un importante mecanismo evolutivo que permitió la diversificación de los metazoarios, su entendimiento es clave para comprender el posible futuro de la evolución de la biota, quedando aún muchas dudas por resolver dentro de este proceso para entender cómo la química de

los minerales fue adaptada a la fisiología de los organismos.

Agradecimientos

Se agradece a la M. en C. Claudia G. Ortiz-Jerónimo por las imágenes 3 y 4 que ilustran este artículo. Se agradece al Dr. Yam Zul Ernesto Ocampo Díaz y a un revisor anónimo por las valiosas observaciones realizadas para mejorar el manuscrito original.

Referencias

- Almodóvar G.R. (2013). Los materiales de la Tierra. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 21, 146-154.
- Benzerara, K. (2011). Biomineralization. In Gargaud, M., Irvine, W. M., Amils, R., James, H., Cleaves, J., II, Pinti, D.L., Quintanilla, J.C., Rouan, D., Spohn, T., Tirard, S., et al., (Eds.). Encyclopedia of Astrobiology. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_185
- Botting, J.P., Butterfield, N.J. (2005). Reconstructing early sponge relationships by using the Burgess Shale fossil *Eiffelia globosa*, Walcott. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 102, 1554-1559.
- Cosmidis, J., Benzerara, K. (2022). Why do microbes make minerals? Comptes Rendus. Géoscience, 354, 1-39.
- Cuny, G. Guinot, G., Enáult, S. (2017). Mineralized tissues. In Cuny, G. Guinot, G., Enáult, S., (Eds.). Evolution of Dental Tissues and Paleobiology in Selachians, Elsevier: Amsterdam, 1-18.
- Dalingwater, J.E., Hutchinson, S., Siveter, D.J. (1991). Cuticular ultrastructure of the trilobite *Ellipsocephalus polytomus* from the Middle Cambrian of Öland, Sweden. Palaeontology, 34, 205-217.
- Franklin, J.F., Lindenmayer, D., McMahon, J.A., McKee, A., Magnuson, J., Perry, D.A., Waide, R., Foster, D. (2000). Threads of continuity: Ecosystem disturbances, biological legacies and ecosystem recovery. Conservation Biology in Practice, 1, 8-16.

- Fuhrmann, J.J. (2021). Microbial metabolism. In Gentry, T.J., Fuhrmann, J.J., Zuberer, D.A., (Eds). Principles and Applications of Soil Microbiology; Elsevier: Amsterdam, 57-87.
- García-Garduño, M.V., Reyes-Gasca, J. (2006). La hidroxiapatita, su importancia en los tejidos mineralizados y su aplicación biomédica. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 9, 90-95.
- Gilbert, P.U.P.A., Bergmann, K.D., Boekelheide, N., Tambutti, S., Mass, T., Marin, F., Adkins, J.F., Erez, J., Gilbert, B., Knutson, V., Cantine, M., Ortega-Hernández, J., Knoll, A.H. (2022). Biomineralization: Integrating mechanism and evolutionary history. Science Advanced, 8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl9653>
- González-Muñoz, M.T., Ben, O.N., Arias, J.M. (1996). Biomineralización: revisión de uno de sus aspectos más destacados. Ars Pharmaceutica, 37, 483-518.
- Katz, M.E., Cramer, B.S., Franzese, A., Hönisch, B., Miller, K.G., Rosenthal, Y., Wright, J.D. (2010). Traditional and emerging geochemical proxies in foraminifera. The Journal of Foraminiferal Research, 40, 165-192.
- Knoll, A. H. (2003). Biomineralization and evolutionary history. Reviews in mineralogy and geochemistry, 54, 329-356.
- Lee, Y.N. (2003). Calcite production by *Bacillus amyloliquefaciens* CMB01. Journal of Microbiology, 41, 345-348.
- Maas, A., Braun, A., Dong, X.-P., Donoghue, P.C.J., Müller, K.J., Olempska, E., Repetski, J.E., Siveter, D. J., Stein, M., Waloszek, D. (2006). The Örsten - More than a Cambrian Konservat-Lagerstätte yielding exceptional preservation. Palaeoworld, 15, 266-282.
- Marlétaz, F. (2019). Zoology: Worming into the Origin of Bilaterians. Current Biology, 29, R577-R579.
- Martí Mus, M., Palacios, T., Jensen, S. (2008). Size of the earliest mollusks: Did small helcionellids grow to become large adults? Geology, 36, 175-178
- Martin, Y.E., Johnson, E.A. (2012). Biogeosciences survey: Studying interactions of the biosphere with the lithosphere, hydrosphere and atmosphere. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 36. <https://doi.org/10.1177/0309133312457107>
- Murdock, D.J.E. (2020). The ‘biomineralization toolkit’ and the origin of animal skeletons. Biological Reviews, 95, 1372-1392.
- Murdock, D.J.E., Donoghue, P.C.J. (2011). Evolutionary origins of animal skeletal biomineralization. Cells Tissues Organs, 194, 98-102.
- Paul, C.R.C. (2009) The fidelity of the fossil record: the improbability of preservation. Paleontology, 52, 485-489.
- Pérez-Huerta, A., Coronado, I., Hegna, T.A. (2018) Understanding biomineralization in the fossil record. Earth-Science Reviews, 179, 95-122.
- Shastri, P.S. (2015). Biomineralization: A confluence of materials science, biophysics, proteomics, and evolutionary biology. Materials Research Society Bulletin, 40, 413-477.
- Soto-Bubert, A. (2003). Introducción a los Biominerales y Biomateriales. Universidad de Chile: Santiago, Chile. [Introducción A Los Biominerales y Biomateriales | PDF | Minerales | Cristal \(scribd.com\)](https://www.scribd.com/document/413477/Introduccion-A-Los-Biominerales-y-Biomateriales)
- Sweet, W.C., Donoghue, P.C.J. (2001). Conodonts: Past, Present and Future. Journal of Paleontology, 75, 1174-1184.
- Wanninger, A., Wollesen, T. (2018). The evolution of molluscs. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 94, 102-115.
- Weiner, S., Dove, P.M. (2003). An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect. Reviews in mineralogy and geochemistry, 54, 1-29.
- Wood, R., Ivantsov, A.Y., Zhuravlev, A.Y. (2017). First macrobiota biomineralization was environmentally triggered. Proceedings of the Royal Society B, 284, 20170059.
- Wood, R. (2018). Exploring the drivers of early biomineralization. Emerging Topics in Life Sciences, 2, 201-212.
- Zamora, S., Rahman, I.A., (2015). Deciphering the early evolution of echinoderms with Cambrian fossils. Frontiers in Palaeontology, 58, 391-391.

Doi.

Artículo de investigación

Prevalencia del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* en anfibios distribuidos en bosque mesófilo de montaña en el sur de México

Prevalence of the fungus *Batrachochytrium dendrobatidis* in amphibians distributed in montane mesophilic forest in southern Mexico

Prevalência do fungo *Batrachochytrium dendrobatidis* em anfíbios distribuídos em floresta mesofílica montana no sul do México

Sarahi Toribio-Jiménez¹ ID. 0000-0002-9243-2649
José Luis Rosas-Acevedo^{1*} ID. 0000-0003-2744-7454
Yanet Romero-Ramírez² ID. 0000-0002-8383-4128
Columba Rodríguez-Alviso¹ ID. 0000-0001-9600-8776
Sergio García-Ibáñez³ ID. 0000-0003-0967-6878
Rosa María Brito-Carmona¹ ID. 0000-0002-9129-5208

¹Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, Universidad Autónoma de Guerrero, Privada de Laurel No. 13 Col. El Roble, 39640, Acapulco, Guerrero., México.

²Laboratorio de Microbiología Molecular y Biotecnología Ambiental, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Av.

Lázaro Cárdenas s/n, Ciudad Universitaria Sur, 39086, Chilpancingo, Guerrero, México.

³Facultad de Ecología Marina, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Gran Vía Tropical 20, Fracc. Las Playas, 39390, Acapulco de Juárez, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia jlrosas@uagro.mx

Enviado: 09/02/2024

Revisado: 02/03/2024

Aprobado: 18/05/2024

Publicado: 20/06/2024

Resumen

La pérdida de las áreas de distribución de la biodiversidad es ocasionada por el estrés que las actividades antropogénicas ejercen en los ecosistemas desde lo local a lo global. Se evaluó la presencia del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* en 26 especies de anfibios asociados a bosque mesófilo de montaña. La infección por quitriomicosis fue diagnosticada por PCR a partir de hisopados cutáneos de anfibios. Los especímenes fueron muestreados en un gradiente altitudinal (500 a 2000 msnm) en temporadas de lluvias y secas. De acuerdo con el análisis Rho de Spearman, se mostró una relación positiva para la ocurrencia de *B. dendrobatidis* en variables como la temperatura corporal, temperatura del sustrato y la humedad, en combinación con otras variables como la etapa de desarrollo y tipo de ambiente que se sabe influyen en la

presencia y desarrollo de *B. dendrobatidis*. Así mismo, se encontró que las especies con desarrollo larvario de vida libre tienen mayor probabilidad de infectarse en comparación con las de desarrollo directo, de este modo, se registraron individuos de anfibios con signos clínicos visibles por quitriomicosis. Los resultados indican que la presencia y prevalencia de *B. dendrobatidis* está relacionada con la susceptibilidad o resistencia de cada una de las especies y su interacción con diversas variables ecológicas; de este modo se encontró que *Exerodonta sumichrasti* y *Ptychohyla leonhardschultzei* resultaron positivas a infección por *B. dendrobatidis*, y en las cuales no hay registros previos en estos ecosistemas.

Palabras clave: Ranas, Quitriomicosis, PCR, Gradiente altitudinal, Temperatura.

Abstract

The loss of biodiversity distribution areas by anthropogenic activities caused for the stress exert on ecosystems from the local to the global level. The presence of the fungus *Batrachochytrium dendrobatidis* was evaluate in twenty-six species of amphibians associated with mountain cloud forest. Chytridiomycosis infection from amphibian skin swabs was diagnose by PCR. The specimens of amphibian were sample at an altitudinal gradient (500 to 2000 meters above sea level) in rainy and dry seasons. According to Spearman's Rho analysis, a positive relationship was show for the occurrence of *B. dendrobatidis* in variables such as body temperature, substrate temperature and humidity, in combination with other variables such as the stage of development and type of environment known the *B. dendrobatidis* presence and development to be influence. Likewise, it was founded that amphibian species with free-living larval development have a greater probability of becoming infected compared to those with direct development in this way, amphibian individuals with visible clinical signs of chytridiomycosis were recorded. The results indicate that *B. dendrobatidis* presence and prevalence is related to the susceptibility or resistance of each of the species and its interaction with various ecological variables; in this way, the amphibian *Exerodonta sumichrasti* and *Ptychohyla leonhardschultzei* they were positive for *B. dendrobatidis* infection and, there are no previous records in these ecosystems.

Keywords: Frogs, Chytridiomycosis, PCR, Altitudinal gradient, Temperature.

Resumo

A perda de áreas de distribuição da biodiversidade é causada pelo estresse que as atividades antropogênicas exercem sobre os ecossistemas em níveis local e global. A presença do fungo *Batrachochytrium dendrobatidis* foi avaliada em 26 espécies de anfíbios associadas a florestas nubladas montanhosas. A infecção por quitriodistose foi diagnosticada por PCR utilizando swabs cutâneos de anfíbios. Os espécimes foram coletados ao longo de um gradiente altitudinal (500 a 2000 m acima do nível do mar) durante as estações chuvosa e seca. De acordo com a análise de correlação de Spearman, foi encontrada uma correlação positiva entre a ocorrência de *B. dendrobatidis* e variáveis como temperatura corporal, temperatura do substrato e umidade, em combinação com outras variáveis como estágio de desenvolvimento e tipo de ambiente, que são conhecidas por influenciar a presença e o desenvolvimento de *B. dendrobatidis*. Da mesma forma, constatou-se que espécies com desenvolvimento larval de vida livre têm maior probabilidade de serem infectadas em comparação com aquelas com desenvolvimento direto. Assim, indivíduos de anfíbios com sinais clínicos visíveis de quitriomicose foram registrados. Os resultados indicam que a presença e a prevalência de *B. dendrobatidis* estão relacionadas à suscetibilidade ou resistência de cada espécie e à sua interação com diversas variáveis ecológicas. Por exemplo, *Exerodonta sumichrasti* e *Ptychohyla leonhardschultzei* apresentaram resultado positivo para infecção por *B. dendrobatidis*, e não há registros anteriores dessas espécies nesses ecossistemas.

Palavras-chave: Rãs, Quitriiomicose, PCR, Gradiente altitudinal, Temperatura.

Introducción

Un ecosistema es un área geográfica o un lugar específico en el que ciertos organismos vivos interactúan entre sí y con el entorno que habitan (Gómez-Márquez, 2023). Los anfibios de todas las regiones biogeográficas del planeta se encuentran expuestos a diversos factores ecológicos que causan la disminución de su población, principalmente, temperatura y humedad; ambas conllevan un efecto negativo en su ciclo reproductivo, como malformaciones congénitas que limitan su supervivencia en el ambiente, lo que las hace más vulnerables a la depredación y a la pérdida o extinción (Parra-Olea *et al.*, 1999; Young *et al.*, 2016). Uno de los principales

procesos que ocasionan alteración de la temperatura, es la fragmentación del hábitat, las variaciones de la temperatura favorecen la propagación de hongos patógenos, que causan afectación a los anfibios, entre estos se encuentra *B. dendrobatidis* causante de quitriomicosis, esta enfermedad afecta las zonas queratinizadas de la piel de los anfibios (Berger *et al.*, 1998; 2002). Es una enfermedad categorizada como emergente y de rápida diseminación (Drew *et al.*, 2006), descrita en diferentes poblaciones de anfibios a nivel mundial (Berger *et al.*, 2005a,b; Johnson y Speare, 2005). Se ha registrado la presencia de este hongo en poblaciones en cautiverio y silvestres (Boyle *et al.*, 2004), algunas variables ecológicas mantienen bajas las densidades del

hospedero; así mismo, favorece la producción y diseminación de zoosporas que son la causa principal de las altas tasas de morbilidad y mortalidad de anfibios (Berger *et al.*, 2005a,b; Lips *et al.*, 2004); la afectación registrada es a más de 300 especies, por lo que es una de las causas importantes que propician su declinación (Berger, *et al.*, 2002; Lips, *et al.*, 2003; Kriger y Hero, 2007).

El hongo *B. dendrobatidis* se desarrolla en un amplio intervalo de temperaturas en el ambiente (Drew *et al.*, 2006); por otro lado, en condiciones de laboratorio su desarrollo es entre los 17°C - 26°C, con un óptimo de 23°C (Piotrowski *et al.*, 2004). De esta manera, a temperaturas $\geq 28^\circ\text{C}$, y $\leq 10^\circ\text{C}$, no es capaz de desarrollarse, o su tasa de replicación puede ser muy baja (Piotrowski *et al.*, 2004); por lo tanto, las poblaciones de anfibios que viven a estas temperaturas no están en riesgo de infección y no se ven afectadas. Sin embargo, se considera a la temperatura como un factor determinante para la persistencia del patógeno en diferentes hábitats, por ello es importante, estudiar las variaciones de temperatura en los hábitats donde se desarrollan los anfibios (Brem y Lips, 2008).

Consideramos que la susceptibilidad de los anfibios está relacionada con la exposición de las especies a las zoosporas de *B. dendrobatidis* y a las condiciones ambientales idóneas (temperatura). La exposición de los anfibios puede estar relacionadas con las características fisiológicas y la abundancia a nivel de familia, por lo que se espera que aquellas familias de anfibios con mayor número de especies asociadas a cuerpos de agua tengan mayor tasa de infección por *B. dendrobatidis* en estos microhábitats.

Además de la temperatura del ambiente, se espera que la temperatura del sustrato, que oscila entre los 24° a 16° C, la humedad relativa arriba del <80% y la precipitación promedio entre los 1000- 1200 mm, propician una mayor tasa de infección por quitridiomycosis por presentar condiciones ambientales idóneas para el desarrollo de *B. dendrobatidis*.

Por consiguiente, el objetivo de este trabajo es conocer las variables ambientales, la historia de vida e identidad taxonómica de diferentes especies de anfibios en el bosque mesófilo de

montaña de la Sierra de Atoyac, Guerrero, que predisponen un mayor riesgo para la infección por *B. dendrobatidis* y reducción de sus poblaciones.

Metodología

Se realizó un estudio observacional descriptivo, en dos etapas: 1) trabajo de campo; y, 2) investigación de laboratorio.

Trabajo de campo

Sitio de muestreo. Se seleccionó la Sierra de Atoyac de Álvarez, Guerrero, por la variedad de endemismo. Existen en la región registros de siete especies de anfibios: *Craugastor guerreroensis*, *C. saltator*, *Eleutherodactylus dilatus*, *Driophytes arboricola*, *Ptychochyla erithromma*, *Sarcochyla chryses* y *Charadrahyla trux* de familias que presentan hábitos diferentes (Eleutherodactylidae más de hojarasca y suelo e Hylidae que tiende a ser arborícola, aunque también existen especies acuáticas, saxícolas o que viven en hojarasca). Se estratificó la Sierra de Atoyac, por intervalos de elevación, desde los 500 a los 2000 msnm, esto abarca diferentes ejidos: Corrales de Río Chiquito, El Molote, Pie de la Cuesta, Río Santiago, Río Verde, Nueva Delhi, San Juan de las Flores, San Vicente de Benítez y San Vicente de Jesús (Tabla 1). Todos los sitios de muestreo se categorizaron por tipo de vegetación de bosque mesófilo de montaña (BMM), repartidos en tres áreas de estudio por intervalo de elevación (500 a 1000 msnm; 1001 a 1500 msnm; 1501 a 2000 msnm) y cinco transectos en cada intervalo altitudinal, con un total de 15 sitios potenciales dentro del BMM; los muestreos se realizaron de abril de 2017 a diciembre de 2018 (Figura 1), se tomó en cuenta la estacionalidad de la zona (lluvias y sequías), se obtuvo un esfuerzo total invertido de aproximadamente 50 días y 510 h/hombre, con el fin de abarcar los diferentes horarios de actividad de las especies de anfibios (Parra-Olea *et al.*, 1999).

Colección de muestras de piel de anfibios. Se colectó con ayuda de un hisopo estéril, un total de 300 muestras de piel de individuos anfibios dentro del gradiente altitudinal. Debido a los hábitos nocturnos de estas especies, el horario de

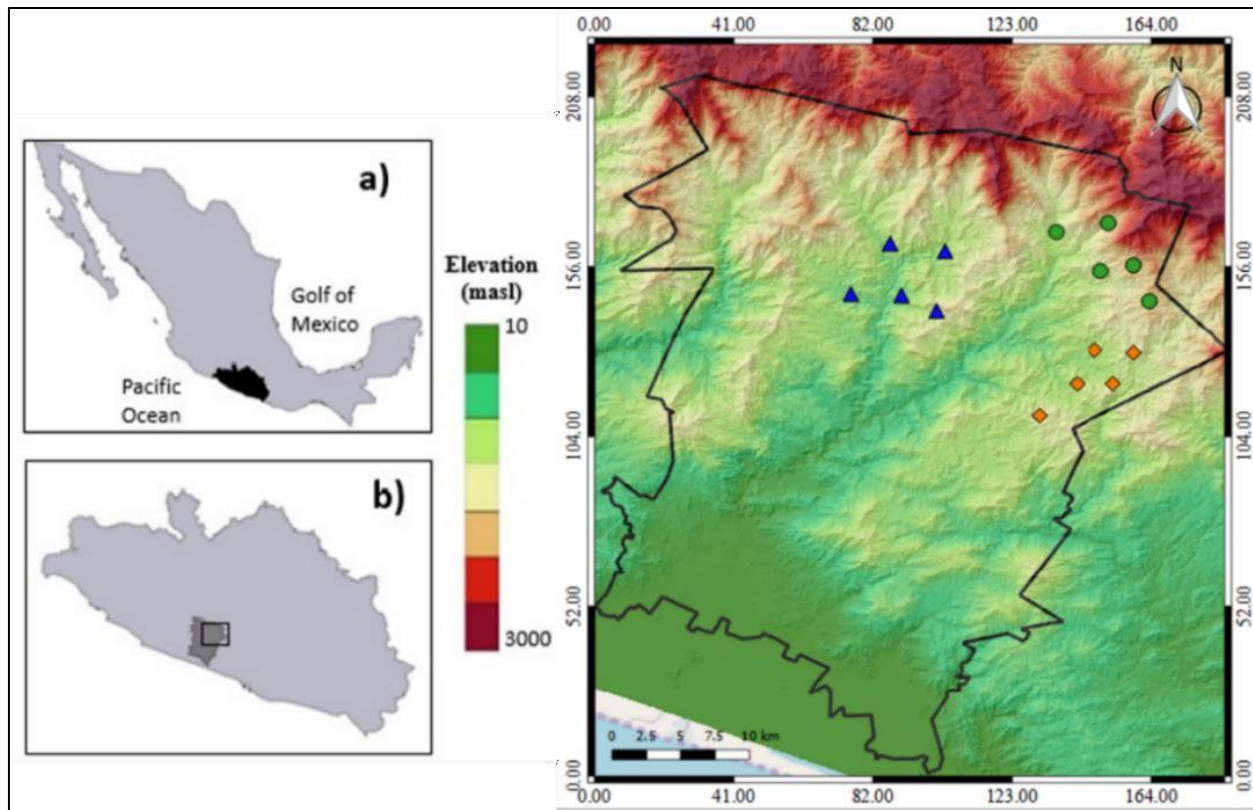


Figura 1. Localización del área de estudio y niveles altitudinales: a) ubicación del estado de Guerrero, en México, b) área de estudio en el municipio de Atoyac de Álvarez, perteneciente del estado de Guerrero, c) puntos de colectas dentro del gradiente altitudinal: 700 msnm (triángulos azules), 1200 msnm (rombos naranjas), 1800 msnm (círculos verdes).

búsqueda de los individuos se realizó por encuentro ocasional durante la noche entre las 19:00 y 03:00 h. aprox. Los lapsos que incluyeron la captura y registro del espécimen fueron de entre 6 y 8 h. Los 300 individuos colectados se colocaron individualmente en bolsas estériles desechables, se registraron los datos de cada individuo en la bitácora de campo, considerando los aspectos que sirvieron para la determinación de la especie, sus características y las condiciones del medio en que se encontró. Para el estudio, los datos contemplados fueron: código del individuo muestreado, nombre de la especie, localidad y altitud en la que fue colectada, número de colecta, fecha y hora de captura, microhábitat y medidas del individuo *Hocico-Cloaca* (Kriger *et al.*, 2006a).

Así mismo, se tomaron los datos ambientales asociados a cada sitio de muestreo, como son

temperatura del ambiente, del sustrato y corporal del individuo, con un termómetro infrarrojo; la humedad mediante un higrómetro, HTC-1; también, las coordenadas de la colecta para cada uno de los individuos; otras variables que se tomaron por sitios de muestreo fueron la precipitación (pluviómetro, Hellman), elevación de la pendiente y la cobertura del dosel, para su posterior correlación con la prevalencia de las quitriomicosis.

Los equipos de campo, como redes, instrumentos y botas fueron desinfectados con etanol al 96%, en el lugar de trabajo para evitar la dispersión del hongo en los demás sitios de muestreo.

Toma de muestra. Los individuos muestreados fueron de etapa metamórfica y adulta, en la cercanía de los sitios. De acuerdo con Kriger *et*

Tabla 1. Características ambientales por promedio en cada uno de los poblados, de acuerdo con los intervalos de elevación donde se ubicaron los 15 sitios de muestreos para la toma de muestra epitelial de anfibios. Las zonas de muestreo fueron de extensión variable, de tal manera que el muestreo se aplicó en puntos aleatorios, de acuerdo con los hábitos biológicos y características fisiológicas de cada especie, además, se consideró el tipo de microhábitat ripario, terrestre, arborícola, saxícola y acuático (Kriger y Hero, 2007).

Poblado	Elevación	Coordenadas	Vegetación	Temperatura °C	Precipitación mm	Humedad %
Corrales de Río		17° 22' 48.71"				
Río Santiago		100° 25' 46.30"				
San Vicente de Benítez	500 a 1000	17°15'10.69" 100°19' 3.04"	BMM	24° a 26°	1200 a 1500	70%
		17°17'50.33" 100°16'59.97"				
Río Verde		17° 16' 37.36" 100°16'15.32"				
San Vicente de Jesús	1000 a 1500	17° 16' 37.36" 100°16'15.32"	BMM	22°	1300 a 1700	80%
Nueva Delhi		17° 33' 07.41" 100° 16' 03.11"				
El Molote	1500 a 2000	17°26'11.30" 100°20'57.56"	BMM	18° a 20°	1300 a 1700	85%
Pie de la cuesta		17°31'24.45" 100°20'57.56"				

al. (2006a,b) a cada individuo se le tomó una muestra cutánea, mediante hisopo estéril. La técnica descrita consiste en pasar girando un hisopo estéril de rayen con punta fina por el cuerpo del individuo, pasando el hisopo por el vientre, el dorso, en las ancas y en las falanges o membrana interdigital, debido a que son las zonas más queratinizadas en los anfibios, y poder asegurar encontrar las zoosporas del hongo. Una vez tomada la muestra, el hisopo se descargó en placas Petri con un medio de cultivo sólido compuesto por triptona, peptona, agar bacteriológico y antibiótico, con el fin de inhibir el crecimiento bacteriano y favorecer el crecimiento de hongos; estas fueron incubadas a 23°C durante cinco y 10 días (Olsen *et al.*, 2004; Kriger *et al.*, 2006a,b; Luja *et al.*, 2012).

Trabajo de laboratorio

De las 300 muestras colectadas de los individuos de anfibios, solo en 177 se presentó crecimiento de hongos sin filamentos, a estas se les extrajo el ADN; para esto, se usó el kit de extracción GeneJet genomic DNA purification (Thermo Scientific ®), de acuerdo con el protocolo de Boyle *et al.* (2004), una vez que el ADN fue cuantificado, se conservó a -20°C para la Reacción en Cadena de Polimerasa (PCR) en su variante punto final, para determinar la presencia del *B. dendrobatidis*.

Detección de B. dendrobatidis en las muestras. Las condiciones e iniciadores fueron los reportados por Annis (2004), la reacción de PCR se hizo a un volumen final de 25 µl (buffer 1X (2.5 µl), dNTP's (2.5 µl), MgCl₂, 2.5 µl, oligo

Bd1 y oligo Bd2 (2 µl de cada uno) a una concentración de 10 pmol y 0.3 de Taq polimerasa y 13.2 de H₂O miliQ). Se utilizó como control positivo DNA de la cepa AL211 donada por el Laboratorio de Biología Molecular de la UNAM, y como control negativo se utilizó agua miliQ estéril. Las condiciones de amplificación fueron: un ciclo a 94°C durante 8 min, seguido por 35 ciclos de a 94°C por 1 min, 59°C por 1 min, seguido por 72° por un min y por último un ciclo a 72° durante 10 min. Posteriormente se realizó electroforesis a cada una de las muestras de ADN, para estimar la presencia o ausencia de *B. dendrobatidis* (Kriger *et al.*, 2006a,b; Hyatt *et al.*, 2007).

Análisis estadísticos. Se registró una base de datos, en la cual se incluyó el número de muestra, las variables ambientales, como: temperatura corporal, temperatura del sustrato, temperatura del ambiente, precipitación, humedad relativa y Longitud H-CL. Todos estos agrupados de acuerdo con el intervalo de elevación correspondiente (500 a 2000 msnm).

A los datos se les aplicó un análisis de Rho de Spearman con el paquete estadístico SPSS para determinar el nivel de asociación entre la prevalencia y los factores ambientales: temperatura corporal, temperatura del sustrato y la del ambiente, Longitud H-CL, Precipitación y humedad relativa.

Resultados y discusión

La causa de la disminución o desaparición de especies sensibles se debe a la alteración de las condiciones ambientales que impactan las interacciones bióticas (Langerhans y Kern, 2020). En los contextos terrestres, Cohen *et al.* (2018) mencionan que la pérdida y/o modificación del hábitat se citan como factores dominantes en la pérdida de especies; por otro lado, los ecosistemas acuáticos, son igual o más susceptibles a las consecuencias de la fragmentación (Young *et al.*, 2016). Por tal razón fue importante determinar si las variables ambientales, la historia de vida e identidad taxonómica de diferentes especies de anfibios en el bosque mesófilo de montaña de la Sierra de Atoyac, Guerrero, predisponen un mayor riesgo para la infección por *B.*

dendrobatidis y por consiguiente ver reducidas sus poblaciones.

La estructura del paisaje y diversidad del hábitat se relacionan con la diversidad de las especies (Hendrickx, *et al.*, 2007; Brem y Lips, 2008), la fauna de agua dulce es particularmente vulnerable al cambio climático, pues su capacidad para rastrear espacialmente los cambios climáticos es muy limitada (Hassall y Thompson, 2008); los ecosistemas se vuelven menos diversos y la vida silvestre es menos abundante (Young *et al.*, 2016). Por lo anterior, se requiere de datos biológicos de diferentes taxones, ecorregiones y tipos de hábitat; es por ello que se establecieron tres tipos de ambientes: acuático lentic, terrestre y, acuático lotico, debido a las características fisiológicas de cada especie, con el supuesto de que el tipo de ambiente está relacionado con el número de individuos positivos a *B. dendrobatidis* (Garner *et al.*, 2006).

Con un esfuerzo de 512 h/hombre se colectaron en 15 sitios de muestreo, 300 individuos de anfibios, durante dos periodos de abril de 2017 y diciembre de 2018, de estos anfibios se tomaron 300 muestras de piel, solo 11 individuos resultaron positivos a quitriomicosis y 289 individuos negativos a la enfermedad a lo largo de un gradiente altitudinal (Brem y Lips, 2008), la concentración varió de 0 a 128 equivalentes genómicos (e.g. 12.3; Tabla 2).

De 300 especímenes colectados, se registraron 132 individuos encontrados en ambiente lentic, de ellos, solo ocho resultaron positivos a *B. dendrobatidis*, por lo tanto, a este tipo de ambiente correspondió el mayor número de organismos infectados, seguido por el ambiente lotico, con dos individuos, y por último el ambiente terrestre con un individuo positivo a *B. dendrobatidis* de los cuatro colectados. Este suceso se asocia con la biología del hongo, el cual libera sus zoosporas en el agua para su desarrollo y crecimiento (Davidson, *et al.*, 2003; Brem y Lips, 2008); de tal modo, las especies con mayor vulnerabilidad de infestación son las que tienen su desarrollo en contacto con hábitos acuáticos (Tabla 3).

Para evaluar la interrelación de las variables, los resultados se analizaron con Rho de Spearman,

Tabla 2. Especies de anfibios positivos a quitriomicosis en intervalos altitudinales de 506 a 1560 msnm.

Especie	Temperatura Corporal °C	Temperatura Sustrato °C	Humedad %	Longitud H-CL	Temperatura Ambiental °C	Elevación msnm
<i>E. sumichrasti</i>	21.2	20.8	33.7	2.6	27.4	506
<i>Plectrohyla sp.</i>	21.2	21.1	31.9	6.0	27.7	518
<i>E. sumichrasti</i>	22.8	22.6	36.7	2.3	26.7	567
<i>P. leonhardschultzei</i>	19.3	19.1	40.1	2.3	26.9	612
<i>T. smithii</i>	18.9	19.3	40.5	2.1	25.6	641
<i>P. leonhardschultzei</i>	19.4	19.2	40.6	2.5	26.7	703
<i>R. sierramadrensis</i>	19.2	19.1	21.8	3.6	23.1	1000
<i>E. sumichrasti</i>	15.8	12.6	22.3	2.1	26.2	1023
<i>R. sierramadrensis</i>	19.4	19	22.4	3.5	25.6	1280
<i>C. augusti</i>	20.3	20	22.4	2.1	23.5	1292
<i>E. juanita</i>	12.3	11.9	20.9	2.3	24.1	1560

Tabla 3. Especies de anfibios infectados por quitriomicosis y su tipo de ambiente encontrados en los sitios de muestreos.

Tipo de ambiente	Especie	Abundancia	Modo reproductivo	Resultados
Acuático lentic	<i>P. leonhardschultzei</i>	15/2		Positivo
	<i>E. juanita</i>	42/1	I. Huevos y renacuajos en estanques de agua temporales	Positivo
	<i>E. sumichrasti</i>	39/3		Positivo
	<i>S.bistincta</i>	4/1		Positivo
	<i>T. smithii</i>	32/1		Positivo
Terrestre	<i>C. augusti</i>	4/1		Positivo
Acuático lotico	<i>L. sierramadrensis</i>	17/2	IV. Acuáticas que nadan libremente	Positivo

Tabla 4. Análisis de Rho de Spearman, se muestran tres valores para cada cruce de variables: 1) el valor de coeficiente de correlación (negritas); 2) el nivel crítico asociado a cada coeficiente (sig.), y 3) el número de casos sobre el que se ha calculado cada coeficiente.

Variable	Cuantificación	Variable	Cuantificación	Variable	Cuantificación
Temperatura corporal	0.086	Intervalo de elevación	0.027	Humedad	0.0006
Correlación coeficiente	300	Correlación coeficiente	300	Correlación coeficiente	300
Sig. (bilateral)		Sig. (bilateral)		Sig. (bilateral)	
N		N		N	
Temperatura sustrato	0.077	Longitud Hocico-Cloaca	-0.114	Temperatura ambiente	0.0009
Correlación coeficiente	300	Correlación coeficiente	300	Correlación coeficiente	300
Sig. (bilateral)		Sig. (bilateral)		Sig. (bilateral)	
N		N		N	

esto mostró una baja relación positiva con la presencia de *B. dendrobatidis* entre la temperatura (T) corporal (0.086), T sustrato (0.077), humedad (0.0006) y, una relación negativa baja con respecto al Log. H-C (-0.114) (Tabla 4).

Además, con las temperaturas asociadas con las muestras positivas a *B. dendrobatidis* en cada intervalo de elevación, se demuestra que las temperaturas óptimas para el crecimiento y desarrollo del hongo en el área estudiada, se establecen entre los 24° y 26° C, en una altitud de 500-1000 msnm, lo que tiene relación con el mayor número de registros positivos de quitridiomycosis (Garner *et al.*, 2006). Así mismo, en las temperaturas promedio que oscilan entre los 20° y 22° C en el intervalo de 1000-1500 msnm, el hongo puede establecerse, pero no logra desarrollo, por lo que las especies de anfibios tienen menor susceptibilidad de adquirir la enfermedad.

Es por ello, como mencionan Kriger y Hero, (2007) que no logra desarrollarse el hongo a temperaturas bajas, desde los 18°C que son temperaturas que por lo general se presentan en el intervalo de elevación de los 1500-2000 msnm,

donde solo se encontró una especie de rana infectada por *B. dendrobatidis*. En este sentido, se comprende que anfibios infectados con distribución en el gradiente altitudinal, las características compartidas son el hábitat en sitios de bosque mesófilo con temperaturas que oscilan entre los 24° y 26°C y humedad superior del 80%, con un grado mayor para *B. dendrobatidis*, donde las especies con desarrollo larvario de vida libre tienen mayor probabilidad de infectarse en comparación con las del desarrollo directo.

Lo anterior es respaldado por estudios donde dichas características se asocian con la infección por *B. dendrobatidis*, lo que genera potencialmente declinaciones poblacionales de diferentes especies de anfibios (Berger *et al.*, 1998, 2005a). La interacción entre el grado de infección de *B. dendrobatidis* y el desarrollo larval como estimador en la infección integran los requisitos ambientales del patógeno con la susceptibilidad natural de los anfibios. Por otra parte, las larvas acuáticas de vida libre pueden transmitir las zoosporas entre sí, como a individuos post metamórficos (Berger *et al.*, 1998). Dichas larvas pueden ser clínicamente saludables, mientras que

los adultos pueden morir, lo cual sugiere que el desarrollo de vida libre, además de ser reservorio, también estaría propiciando la persistencia de *B. dendrobatidis* en el ambiente (Kriger *et al* 2006a, b).

Por su parte, en especies de desarrollo directo, la transmisión de zoosporas de *B. dendrobatidis* no implicaría riesgo de contagio en etapas larvales y su transmisión podría relacionarse con otro mecanismo, como lo son las variables ambientales, temperaturas extremas y sequías, que no favorecen la presencia y desarrollo de la enfermedad, de modo que el estado actual del flujo climático propicia impactos de las variaciones de temperatura en la biota del mundo (Kriger y Hero, 2007).

Cabe considerar que el uso de enfoques basados en rasgos de los anfibios y su entorno han permitido identificar especies susceptibles a *B. dendrobatidis*, e incluso su resistencia o tolerancia (Lips *et al.*, 2003). Por lo tanto, en los sitios seleccionados para el muestreo, se presentan condiciones ambientales idóneas para la presencia del patógeno, debido a que las temperaturas intermedias y la humedad, en teoría permiten su desarrollo y al mismo tiempo su transmisión, la cual dependerá de cómo dichos cambios afecte el ensamble de especies locales.

En efecto, la infección permaneció sin cambio a lo largo de todo el año, se sabe que, en los sitios de muestreo las condiciones de temperatura ambiental y del sustrato, así como la humedad no permanecen estables a lo largo del año (Kriger y Hero, 2007); por lo tanto, es de suma importancia establecer, si alguna condición física en ambiente condiciona de alguna forma la infección en los organismos. En este aspecto, no se tiene conocimiento de que algún trabajo divida al clima en factores ambientales, e intente relacionar a alguno de ellos con la infección por *B. dendrobatidis*, en razón de que la mayoría solo la relacionan con el clima en su totalidad (Berger *et al.*, 1998; 2005a,b; Kriger y Hero, 2007).

De acuerdo con el análisis Rho de Spearman, ninguna de las variables físicas resultó fuertemente relacionada con la concentración de esporas, por lo que no existe relación en cuanto a la temperatura ambiental, esta nula relación es similar con un estudio realizado a una especie de

rana (*Mixophyes fasciolatus*) en donde las temperaturas menores a 24°C se relacionan con la muerte de los organismos y el grado de infección en condiciones de cautiverio (Berger *et al.*, 2005a,b; Frías-Álvarez *et al.*, 2008).

Las consecuencias de una barrera determinada de acuerdo con Langerhans y Kern (2020), pueden ser difíciles de predecir, tomando en cuenta que especies estrechamente relacionadas pueden responder de manera diferente a la misma barrera, como lo registra con los anfibios Frías-Álvarez *et al.*, (2008). En este sentido, hay evidencia que *Atelopus zeteki* sobrevive más a 23°C que a 17°C (Berger *et al.*, 1998). De igual forma, la temperatura corporal se ve moldeada por la del sustrato, debido a que los individuos de la familia Hylidae se comportan de una forma críptica en sus ambientes, es decir permanecen debajo de hojarasca y en troncos podridos. Ambas temperaturas en estos ambientes no tienen relación con respecto de la concentración de zoosporas, debido a que con estos factores no se tiene conocimiento de algún trabajo que los relacione; según Harris *et al.* (2006) mencionan que el desarrollo de *B. dendrobatidis*, es inhibido por bacterias cutáneas en algunos anfibios.

Si bien es cierto que la fragmentación del ecosistema puede conllevar una gran cantidad de impactos ambientales adicionales (Langerhans y Kern, 2020), dando lugar a poblaciones más pequeñas y aisladas (Pietrowsky *et al.*, 2004), es por ello que no se puede profundizar más con los resultados obtenidos hasta ahora, sin embargo, consideramos que es muy probable que el comportamiento y el contraste con las variables tendría que ser similar a la temperatura ambiental. La inclusión de los actores sociales asentados en las diferentes comunidades del área de estudio permitirá su participación en el desarrollo de futuras investigaciones, mediante el método de investigación-acción, basado en un paradigma sociocrítico para generar un cambio en la conservación de los recursos naturales, a partir del interés propio de los participantes dentro de un contexto de educación ambiental crítica (Díaz-Ruiz, *et al.*, 2022) para concretar las relaciones sociales como sugieren Foladori y Tommasino (2012) en un motor de la investigación científica. Por su parte, Gómez-Márquez (2023) menciona

que la importancia de conservar la biodiversidad y preservar los ecosistemas naturales es esencial, porque, además de mantener la riqueza biológica de nuestro planeta, rara vez sabemos qué especies son críticas para el funcionamiento actual o proporcionan resiliencia y resistencia a los cambios ambientales en los ecosistemas, como es el caso, en este estudio, con la interrelación patógeno-hospedero, del que hay largo camino por recorrer para establecer su contribución a la homeostasia del ecosistema estudiado (Pounds *et al.*, 1997).

Conclusiones

Los cambios de la densidad de las poblaciones dan como resultado una mayor o menor competencia, esto depende de la calidad del hábitat y la abundancia de los recursos. La situación actual del hongo *B. dendrobatidis*, afecta en un 3.6% a la riqueza de especies de anfibios, lo que impacta en la distribución y prevalencia de la quitridiomycosis en anfibios en el bosque mesófilo de montaña; este ecosistema es vulnerable a cambios bruscos de temperatura y prioritaria para la conservación en el estado de Guerrero. Se ha generado una línea base de datos sobre *B. dendrobatidis* en la estructura y composición de los ensamblajes de anfibios asociados a diferentes tipos de vegetación asociados al bosque mesófilo de montaña e intervalos altitudinales; ello permitirá a mediano y largo plazo dilucidar a través de estudios moleculares, aspectos genéticos, biológicos y ecológicos, el efecto de las alteraciones en la fragmentación del hábitat en la interrelación parásito-hospedero y el diseño de estrategias para la conservación de este recurso natural. Considerar los factores externos como la escala de tiempo de la fragmentación, historia de vida, capacidad de dispersión, pequeñas cantidades de flujo de genes que influyen en la evolución de las poblaciones en sitios fragmentados, son algunos aspectos por seguir estudiando. La participación social de las localidades en regiones con amplia trascendencia biológica, como en el caso del área de estudio, por sus valores éticos en preservar los recursos naturales es importante para la conservación. Evaluar la afectación potencial de

los ecosistemas que se encuentran en una situación de vulnerabilidad y en interacción con distintos tipos de peligros naturales o derivados de las actividades del hombre, afectan, de una u otra forma, los distintos satisfactores asociados al bienestar socioambiental.

Referencias

- Annis, S.L., Dastoor, F.P., Ziel, H., Daszak, P., and Longcore, J.E. (2004). A DNA-based assay identifies *Batrachochytrium dendrobatidis* in amphibians. *Journal of Wildlife Diseases*, 40, 420–428.
- Berger, L., Speare, R., Daszak, P., Green, D.E., Cunningham, A.A., Goggin, C.L., Slocumbe, R., Ragan, M.A., Hyatt, A.D., McDonald, K.R., Hines, H.B., Lips, K.R., Marantelli, G., Parkes, H. (1998). Chytridiomycosis causes amphibian mortality associated with population declines in the rainforests of Australia and Central America. *Proceedings of the National Academy of Science of USA*, 95, 9031-9036.
- Berger, L., Hyatt, A.D., Olsen, V., Hengstberger, S.G., Boyle, D., Marantelli, G., Humphreys, K., Longcore, J.E. (2002). Production of polyclonal antibodies to *Batrachochytrium dendrobatidis* and their use in an immunoperoxidase test for chytridiomycosis in amphibians. *Diseases of Aquatic Organisms*, 48, 213-220.
- Berger, L., Hyatt, A.D., Speare, R., Longcore, J.E. (2005a). Life Cycle of the amphibian chytrid *Batrachochytrium dendrobatidis*. *Diseases of Aquatic Organisms*, 68, 51-63.
- Berger, L., Marantelli, G., Skerratt, L.F., Speare, R. (2005b). Virulence of the amphibian chytrid fungus *Batrachochytrium dendrobatidis* varies with the strain. *Diseases of Aquatic Organisms*, 68, 47-50.
- Boyle, D.G., Boyle, D.B., Olsen, V., Morgan, J.A.T., Hyatt, A.D. (2004). Rapid quantitative detection of chytridiomycosis (*Batrachochytrium dendrobatidis*) in amphibian samples using real-time Taqman PCR assay. *Diseases of Aquatic Organisms*, 60, 141-148.
- Brem, F.M., Lips, K.R. (2008). *Batrachochytrium dendrobatidis* infection patterns among Panamanian amphibian species, habitats, and

- elevations during epizootic and enzootic. *Diseases of Aquatic Organisms*, 81, 189-202.
- Cohen, J.M., Lajeunesse, M.J., Rohr, J.R. (2018). A global synthesis of animal phenological responses to climate change. *Nature Climate Change*, 8, 224-228.
- Davidson, E.W., Parris, M., Collins, J.P., Longore, J.E., Pessier, A.P., Brunner, J. (2003). Pathogenicity and Transmission of Chytridiomycosis in Tiger Salamanders (*Ambystoma tigrinum*). *Copeia*, 3, 601-607.
- Díaz-Ruiz, M., Giraldo-Gomez, Y.V., Molina, M.C. (2022). Formación en Educación Ambiental Crítica en una comunidad de aprendizaje de docentes. *Revista de educación ambiental y sostenibilidad* 4, 1302-1320.
- Drew, A., Allen, E.J., Allen, L.J.S. (2006). Analysis of climatic and geographic factors affecting the presence of chytridiomycosis in Australia. *Diseases of Aquatic Organisms*, 68, 245-250.
- Frías-Álvarez, P., Vredenburg, V.T., Familiar-López, M., Longcore, J.E., González-Bernal, E., Santos-Barrera, G. et al. (2008). Chytridiomycosis survey in wild and captive Mexican amphibians. *EcoHealth*, 5, 18-26.
- Foladori, G., Tommasino, H. (2012). La solución técnica a los problemas ambientales. *R. Katál., Florianópolis*, 15, 79-83.
- Garner, T.W.J., Perkins, M.W., Govindarajulu, P., Seglie, D., Walker, S., Cunningham, A.A., Fisher, M.C. (2006). The emerging pathogen *Batrachochytrium dendrobatidis* globally infects introduced populations of the North American bull frog, *Rana catesbeiana*. *Biology Letters*, 2, 455-459.
- Gómez-Márquez, J. (2023). A new definition and three categories for classifying ecosystems. *Academia Biology*, 1-9.
doi.org/10.20935/AcadBiol6072
- Harris, R.N., Timothy, Y., Lauer, J., Mary Alice Simon MA, Patel, A. (2006). Amphibian Pathogen *Batrachochytrium dendrobatidis* Is Inhibited by the Cutaneous Bacteria of Amphibian Species. *EcoHealth* 3, 53-56.
- Hassall, C., Thompson, D.J. (2008). The effects of environmental warming on Odonata: a review. *International Journal of Odonatology*, 11, 131-153.
- Hendrickx, F., Maelfait, J-P., Van Wingerden, W., Schweiger, O., Speelmans, M., Aviron, S., Augenstein, I., et al. (2007). How landscape structure, land-use intensity and habitat diversity affect components of total arthropod diversity in agricultural landscapes. *Journal of Applied Ecology* 2007 44, 340-351.
- Hyatt, A.D., Boyle, D.G., Olsen, V., Boyle, D.B., Berger, L., Obendorf, D., Dalton, A., Kriger, K., Hero, M., Hines, H., Phillott, R., Campbell, R., Marantelli, G., Gleason, F., Colling, A. (2007). Diagnostic assays and sampling protocols for the detection of *Batrachochytrium dendrobatidis*. *Diseases of Aquatic Organisms*, 73, 175-192.
- Johnson, M.L., Speare, R. (2005). Possible modes of dissemination of the amphibian chytridio *Batrachochytrium dendrobatidis* in the environment. *Diseases of Aquatic Organisms*, 65, 181-186.
- Kruger, K.M., Hero, J.M. (2007). The chytrid fungus *Batrachochytrium dendrobatidis* is non-randomly distributed across amphibian breeding habitats. *Diversity and Distributions*, 13, 781-788.
- Kruger, K.M., Hines, H.B., Hyatt, A.D., Boyle, D.G., Hero, J.M. (2006a). Techniques for detecting chytridiomycosis in wild frogs: comparing histology with real-time Taqman PCR. *Diseases of Aquatic Organisms*, 71, 141-148.
- Kruger, K.M., Hero, J.M., Ashton, K.J. (2006b). Cost-efficiency in the detection of chytridiomycosis using PCR assay. *Diseases of Aquatic Organisms*, 71, 149-154.
- Langerhans, R.B., Kern, E.M.A. (2020). Urbanization and evolution in aquatic environments. In M. Szulkin, J. Munshi-South, A. Charmantier (Eds). *Urban evolutionary biology*. Oxford, University Press, 157-174.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780198836841.003.0010>
- Lips, K.R., Green, D.E., Papendick, R. (2003). Chytridiomycosis in wild frogs from Southern Costa Rica. *Journal of Herpetology*, 37, 215-218.
- Lips, K.R., Mendelson III, J.R., Muñoz-Alonso, A., Canseco-Márquez, L., Mulcahy, D.G. (2004). Amphibian population declines in montane Southern Mexico: resurveys of

- historical localities. *Biological Conservation*, 119, 555-564.
- Luja, V.H., Rodríguez-Estrella, R., Ratzlaff, K., Parra-Olea, G., Ramírez-Bautista, A. (2012). The chytrid fungus *Batrachochytrium dendrobatidis* in isolated populations of the Baja California tree Frog *Pseudacris hypochondriaca* curta in Baja California Sur, Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 57, 323-327.
- Olsen, V, Hyatt, A.D., Boyle, D.G., Mendez, D. (2004). Co-localisation of *Batrachochytrium dendrobatidis* and keratin for enhanced diagnosis of chytridiomycosis in frogs. *Diseases of Aquatic Organisms*, 61, 85-88.
- Parra-Olea, G., García-Paris, M., Wake, D.B. (1999). Status of some populations of Mexican salamanders (Amphibia: Plethodontidae). *Revista de Biología Tropical*, 47, 217-223.
- Piotrowski, J.F., Annis, S.L., Longore, J.E. (2004). Physiology of *Batrachochytrium dendrobatidis*, a chytrid pathogen of amphibians. *Mycologia*, 96, 9-15.
- Pounds, J.A., Fogden, M.P.L., Savage, J.M., Gorman, G.C. (1997). Tests of null models for amphibian declines on a tropical mountain. *Conservation Biology*, 11, 1307-1322. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1997.95485.x>
- Young, H.S., McCauley, D.J., Galetti, M., Dirzo, R. (2016). Patterns, Causes, and Consequences of Anthropocene Defaunation. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 47, 333-358.

Doi.

Artículo de investigación

**Desafíos, oportunidades y amenazas en la protección y conservación de
tortugas marinas en Guerrero, México**
**Challenges, opportunities and threats in the protection and conservation of
sea turtles in Guerrero, Mexico**
**Desafios, oportunidades e ameaças na proteção e conservação de tartarugas
marinhas em Guerrero, México.**

José Luis Sandoval-Ramírez¹ ID. 0000-0002-3911-7690

Adriana Sandoval-Ramírez^{2*} ID. 0000-0002-1237-1920

Rafael Flores-Garza³ ID. 0000-0002-6926-3250

Ricardo Herrera-Navarrete¹ ID. 0000-0002-9175-4486

Himmer Castro-Mondragón³ ID. 0000-0002-9342-5184

Francisco Rubén Castañeda-Rivero⁴ ID. 0000-0001-6047-3553

¹Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, Universidad Autónoma de Guerrero. Privada Laurel 13, Col. El Roble, 39640, Acapulco de Juárez, Guerrero, México.

²Universidad del Mar, Campus Puerto Ángel, Ciudad Universitaria, 70902, San Pedro Pochutla, Oaxaca, México.

³Facultad de Ecología Marina, Universidad Autónoma de Guerrero. Gran Vía Tropical 20, Fracc. Las Playas, 39390, Acapulco de Juárez, Guerrero, México.

⁴Instituto de Biodiversidad y Áreas Naturales Protegidas del Estado de Quintana Roo. Calle Hidroeléctrica de Malpaso 398, Campestre, 77030, Chetumal, Quintana Roo, México.

*Autor de correspondencia sanramz11@gmail.com

Enviado: 09/02/2024

Revisado: 02/03/2024

Aprobado: 18/05/2024

Publicado: 20/06/2024

Resumen

La protección y conservación de tortugas marinas en el estado de Guerrero cuenta con más 50 años de experiencia. Sin embargo, hasta la fecha ningún estudio ha descrito la protección y conservación a nivel estatal. El objetivo de la presente investigación fue identificar los desafíos, las oportunidades y las amenazas futuras respecto a la protección y conservación de tortugas marinas en Guerrero, México. Se realizaron 24 entrevistas con preguntas abiertas (28) y cerradas (7) a personal de dependencias de gobierno, actores de una comunidad y a responsables técnicos de campamentos tortugueros, durante el año 2020 en el estado de Guerrero. Las preguntas se clasificaron en cuatro categorías: 1) problemas relacionados con la conservación de tortugas marinas en Guerrero, 2) biología de la reproducción, 3) ecología de poblaciones y 4) estrategias

de conservación. Mediante un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas), se registraron las fortalezas en la organización entre campamentos tortugueros y dependencias de gobierno; respecto a las oportunidades, se registró la educación ambiental. Sin embargo, esta misma muestra debilidad debido a que tiene poco alcance; se registraron debilidades en la falta de educación ambiental, poca investigación, falta de recursos humanos y económicos, ausencia de información en los reportes, desacuerdos con la NOM-162 SEMARNAT, inseguridad, falta de inspecciones, tramitología, permisos y multas; finalmente, dentro de las amenazas se encontraron desastres naturales, impactos antropogénicos e inseguridad. Esta investigación demostró que existen más debilidades y amenazas que fortalezas y oportunidades en la conservación de tortugas marinas a nivel estatal. Estos resultados proveen información fundamental para tomar medidas al respecto, para mejorar la protección y conservación de tortugas marinas en el estado de Guerrero.

Palabras clave: Conservación, Proporción de sexo, Éxito reproductivo, Calidad de crías, Estrategias de mitigación.

Abstract

The protection and conservation of sea turtles in the state of Guerrero has more than 50 years of experience, however, currently no study has described the protection and conservation at the state level. The objective of this research was to identify future challenges, opportunities, and threats regarding the protection and conservation of sea turtles in Guerrero, Mexico. Twenty-four interviews with open (28) and closed (7) questions were conducted with personnel from government agencies, community actors and technical managers of turtle camps, during the year 2020 in the state of Guerrero. The questions are classified into four categories: 1) problems related to sea turtle conservation in Guerrero, 2) reproduction biology, 3) population ecology, and 4) conservation strategies. Through a SWOT analysis (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats), the strengths in the organization between turtle camps and government agencies were recorded; regarding opportunities, environmental education was produced, however this same shows weakness because it has little scope; Weaknesses were recorded in the lack of education, little research, lack of human and economic resources, absence of environmental information in the reports, disagreements with NOM-162 SEMARNAT, insecurity, lack of inspection, paperwork, permits and fines; finally, among the threats were natural disasters, anthropogenic impacts and insecurity. This investigation revealed that there are more weaknesses and threats than strengths and opportunities in sea turtle conservation at the state level. These results provide fundamental information to take measures in this regard, to improve the protection and conservation of sea turtles in the state of Guerrero.

Keywords: Conservation, Sex ratio, Reproductive success, Hatchling quality, Mitigation strategies.

Resumo

A proteção e conservação das tartarugas marinhas no estado de Guerrero conta com mais de 50 anos de experiência. No entanto, até o momento nenhum estudo descreveu a proteção e conservação em nível estadual. O objetivo desta pesquisa foi identificar os desafios, oportunidades e ameaças futuras em relação à proteção e conservação das tartarugas marinhas em Guerrero, México. Foram realizadas 24 entrevistas com perguntas abertas (28) e fechadas (7) com funcionários de órgãos governamentais, atores comunitários e gestores técnicos de acampamentos de tartarugas, durante o ano de 2020 no estado de Guerrero. As questões foram classificadas em quatro categorias: 1) problemas relacionados à conservação das tartarugas marinhas em Guerrero, 2) biologia reprodutiva, 3) ecologia populacional e 4) estratégias de conservação. Através de uma análise SWOT (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças), foram registrados os pontos fortes na organização entre acampamentos de tartarugas e agências governamentais; Em relação às oportunidades, foi registrada a educação ambiental. Porém, este mesmo apresenta fragilidade por ter pouca abrangência; Foram registradas fragilidades na falta de educação ambiental, pouca pesquisa, falta de recursos humanos e econômicos, ausência de informações

nos relatórios, divergências com a NOM-162 SEMARNAT, insegurança, falta de fiscalizações, burocracia, alvarás e multas; Finalmente, entre as ameaças estavam os desastres naturais, os impactos antropogénicos e a insegurança. Esta pesquisa demonstrou que existem mais pontos fracos e ameaças do que pontos fortes e oportunidades na conservação das tartarugas marinhas em nível estadual. Estes resultados fornecem informações fundamentais para tomar medidas que melhorem a proteção e conservação das tartarugas marinhas no estado de Guerrero.

Palavras-chave: Conservação, Proporção sexual, Sucesso reprodutivo, Qualidade da prole, Estratégias de mitigação.

Introducción

Las poblaciones de tortugas marinas a nivel mundial hasta hace un par de siglos eran abundantes. Sin embargo, dichas poblaciones disminuyeron drásticamente por sobre-explotación en las décadas de los años 60's y 70's

([National Research Council, 1990](#); [Seminoff y Shanker, 2008](#); [SEMARNAT, 2022](#)). Las tortugas marinas han sido históricamente un importante recurso alimenticio para muchos habitantes costeros de México ([Senko *et al.* 2009](#)). En México, la pesquería de tortugas marinas se desarrolló de tal manera que durante casi dos

décadas (1965-1982) contribuyó con más de la mitad de la producción mundial (Márquez-Millán, 1996). Estas especies se encuentran en distintas categorías (vulnerables, en peligro de extinción y en peligro crítico de extinción) en la Lista Roja, diseñada por la Unión Internacional para la Conservación de la naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés). Sin embargo, esta categoría no refleja el verdadero riesgo de extinción de especies de tortugas marinas en diferentes regiones alrededor del mundo, por un lado, se debe a la ausencia de una gran cantidad de datos e información y, por otro lado, carece de fuentes confiables y actualizadas (Seminoff y Shanker, 2008; Senko *et al.* 2022). Como medida de mitigación, en varias playas alrededor del mundo se comenzó con la protección y conservación de tortugas marinas, mediante la operación de campamentos tortugueros, cuyas principales funciones son el traslado de nidos desde condiciones *in situ* a viveros y la liberación de crías (Maulany *et al.*, 2012). En México han existido varios manuales sobre técnicas de manejo, protección y conservación de tortugas marinas (Instituto Nacional de Ecología, 1990, SEMARNAT, 2022). Actualmente, todos los campamentos tortugueros a nivel nacional se rigen por la NOM-162-SEMARNAT-2012 (norma oficial mexicana), que establece las especificaciones para la protección, recuperación y manejo de las poblaciones de las tortugas marinas en su hábitat de anidación (Gaona-Pineda y Barragán-Rocha, 2016).

En la actualidad, existen diversas investigaciones sobre tortugas marinas (biología de la reproducción, biogeografía, ecología de poblaciones, amenazas, estrategias de conservación), dado que prácticamente varias áreas del conocimiento aportan información al respecto (Hamann *et al.*, 2010; Jourdan y Fuentes, 2015; Gaona-Pineda y Barragán-Rocha, 2016). Sin embargo, no se han evaluado a fondo los programas de protección y conservación en tortugas marinas.

Actualmente, las tortugas marinas enfrentan diversas amenazas como: el saqueo huevos, explotación comercial de tortugas juveniles y adultas, destrucción de hábitats de anidación, contaminación, depredación, bajo éxito de

eclosión de los nidos, captura incidental de pesquerías costeras y pelágicas y captura dirigida para consumo y uso de sus productos y subproductos (National Research Council, 1990; Lutcavage *et al.*, 1997; Balladares y Dubois, 2014; Burger y Gochfeld, 2014; Méndez-Rodríguez y Álvarez-Castañeda, 2016; Olivier de la Esperanza *et al.*, 2017; Senko *et al.*, 2022). Además, algunos autores, consideran que proyecciones de cambios en la temperatura global, aumento del nivel del mar, precipitaciones e incremento en la intensidad de huracanes y tormentas en zonas tropicales debido al calentamiento global, tendrán un efecto en el ciclo de vida y desarrollo reproductivo de las tortugas marinas (Hawkes *et al.*, 2007; Poloczanska *et al.* 2009, Patiño-Martínez *et al.* 2014, Jourdan y Fuentes, 2015).

El estado de Guerrero tiene un alto desarrollo urbano en sus costas, lo cual ha ocasionado que los ecosistemas estén fuertemente transformados por las actividades agropecuarias y por los centros turísticos y múltiples poblados rurales (Martínez *et al.* 2014). En este estado se encuentran algunas de las playas más importantes de anidación de tortugas marinas a nivel nacional, entre las especies que desovan en estas playas están *Lepidochelys olivacea*, *Dermochelys coriacea*, *Chelonia mydas* y *Eretmochelys imbricata*.

El objetivo del presente trabajo fue identificar los desafíos y oportunidades que implica la protección y conservación de tortugas marinas en el estado de Guerrero, con el propósito de incrementar el conocimiento y proveer información para la toma de decisiones o acciones futuras.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estado de Guerrero se ubica en el sur de la República Mexicana, en el Pacífico Oriental Tropical entre los 16° 18' y 18° 48' N y los 98° 03' y 102° 12' O.

Análisis cualitativo

Se contactó a los diferentes actores (personal de dependencias de gobierno, actores de una comunidad y responsables técnicos de

campamentos tortugueros), y se acordó el lugar y fecha para proceder a realizar las entrevistas. Las entrevistas durante la presente investigación se realizaron a lo largo de diferentes municipios costeros del estado de Guerrero: La Unión de Isodoro Montes de Oca, Zihuatanejo de Azueta, Petatlan, Técpan de Galeana, Benito Juárez, Coyuca de Benítez, Acapulco de Juárez, San Marcos, Florencio Villareal, Copala, Marquelia y Cuajinicuilapa. Se realizaron entrevistas con 28 preguntas abiertas y 7 cerradas (cuestionario aplicado únicamente al personal encargado de los campamentos tortugueros) durante el año 2020, con la finalidad de obtener información más detallada de los diferentes actores involucrados en la protección y conservación de tortugas marinas en el estado de Guerrero. Las preguntas cubrieron aspectos sobre problemas económicos, sociales y ambientales y sobre conocimientos respecto a las tortugas marinas, como: éxito reproductivo, calidad de crías, proporción de sexo, y estrategias de mitigación. Se realizaron entrevistas a cuatro actores de dependencias federales y estatales, como son PROFEPA, SEMAREN Guerrero, SEMARNAT y CONANP. Los actores responsables técnicos son personas especializadas en el manejo de vida silvestre y se encargan de elaborar el plan de manejo o aprovechamiento no extractivo. También, se entrevistó a tres actores de la comunidad (voluntarios de campamentos tortugueros). Todas las entrevistas fueron presenciales (duraron aproximadamente 30 minutos), en las oficinas de los actores de dependencias, en las casas de los actores de la comunidad o en las instalaciones de los campamentos tortugueros, con la finalidad de hacerlos sentir más cómodos. Posteriormente, con la información recopilada se realizó un análisis de identificación de las fortalezas, las oportunidades, las debilidades y las amenazas (FODA).

Resultados

Se realizaron 24 entrevistas, aplicadas a 22 actores de sexo masculino y 2 actores de sexo femenino. La mayoría de los actores cuenta con nivel de licenciatura (16), mientras que algunos tienen nivel de preparatoria (5), maestría (2) y doctorado (1). Su rango de edad varió entre 33 a

60 años. Se registró un total de 1 fortaleza, 1 oportunidad, 8 debilidades y 3 amenazas en la protección y conservación de tortugas marinas en Guerrero (Figura 1).

Todos los actores estuvieron de acuerdo en que la temperatura es la variable que más influye en la proporción de sexo. Sin embargo, casi la mitad de estos no conocen el rango adecuado para producir una proporción de 50:50% (temperatura pivote). El 53 % de los actores señalan que la mayoría de las crías producidas a nivel estatal bajo condiciones *in situ* probablemente son hembras, mientras que, en condiciones de vivero, 53 % de los actores consideran que la proporción de sexo es de 50:50 (Figura 2).

Los actores reconocen que es importante la selección del sitio de anidación como: el tipo de grano de la arena, temperatura, distribución geográfica, espacio disponible, pendiente de la playa, iluminación de las playas, y que estos factores influyen en el éxito de incubación. La mayoría de los actores (75 %) identificó el rango de temperatura adecuado (27-33 ° C) para producir un alto éxito de incubación. La mayoría de los actores (75 %), estuvieron de acuerdo que, si se da una protección y manejo adecuada de nidos, es posible obtener un alto éxito de incubación en condiciones de vivero. El 44 % de los actores consideran que el éxito de incubación de nidos *in situ* es bajo o malo (Figura 3).

La mayoría de los actores (66 %) consideran que una cría de buena calidad, es aquella que es más vigorosa (más saludable), y por lo regular, se da en nidos incubados en condiciones de temperaturas adecuadas o menos extremas (entre los meses de noviembre y diciembre), mientras que las crías que nacen bajo condiciones más calurosas, suelen ser de menor calidad. Sin embargo, 83 % de los actores desconocen las variables que determinan la calidad de crías. Para la mayoría de los actores (70 %), la calidad de crías es mejor en condiciones de vivero a comparación de *in situ* debido a un manejo adecuado (Figura 4).

El 47 % de los actores consideran que la conservación a nivel estatal es exitosa (Figura 5), debido a que han notado un 1) incremento en las poblaciones de tortugas marinas, 2) mayor organización (Mesa Guerrerense) y 3)

capacitación (información básica sobre el funcionamiento y manejo de las especies). Sin embargo, el resto considera que las actividades que se han realizado en pro de la conservación de tortugas marinas en Guerrero han sido insuficientes, debido a que: 1) son pocos los

campamentos que trabajan correctamente (cada campamento utiliza una técnica de incubación distinta); 2) la carencia de una cultura ambiental; 3) varios campamentos están cerrando por falta de recursos; 4) existe muy poca inspección y vigilancia; y, 5) falta de investigación.

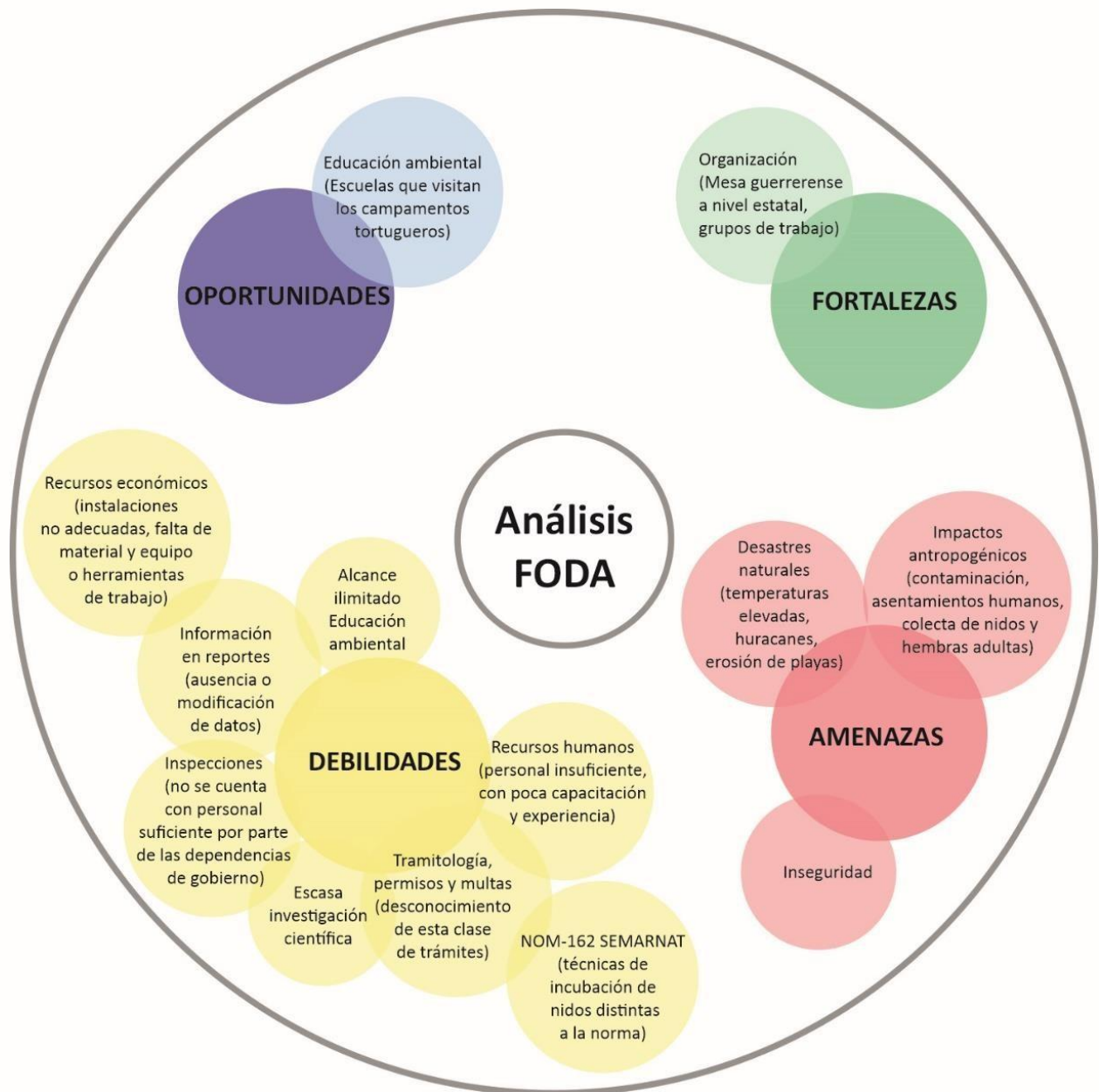


Figura 1. Análisis FODA de la protección y conservación de tortugas marinas en el estado de Guerrero.

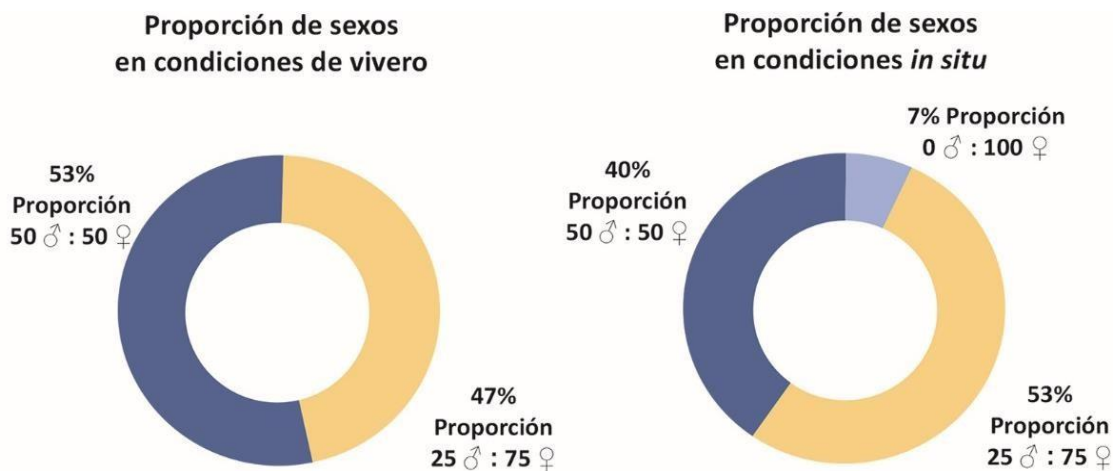


Figura 2. Proporción de sexo de tortugas marinas en condiciones de vivero e *in situ* en Guerrero.



Figura 3. Éxito de incubación de tortugas marinas en condiciones de vivero e *in situ* en Guerrero.

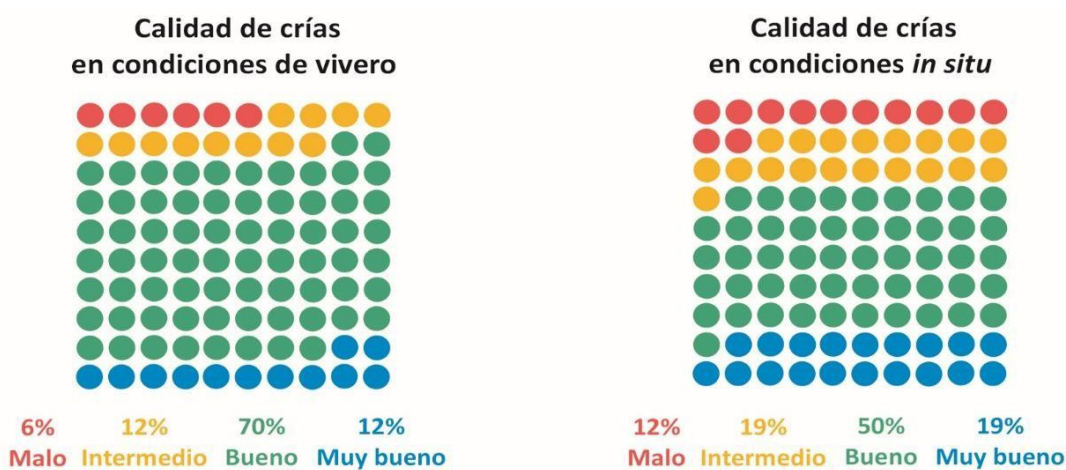


Figura 4. Calidad de crías de tortugas marinas en condiciones de vivero e *in situ* en Guerrero.

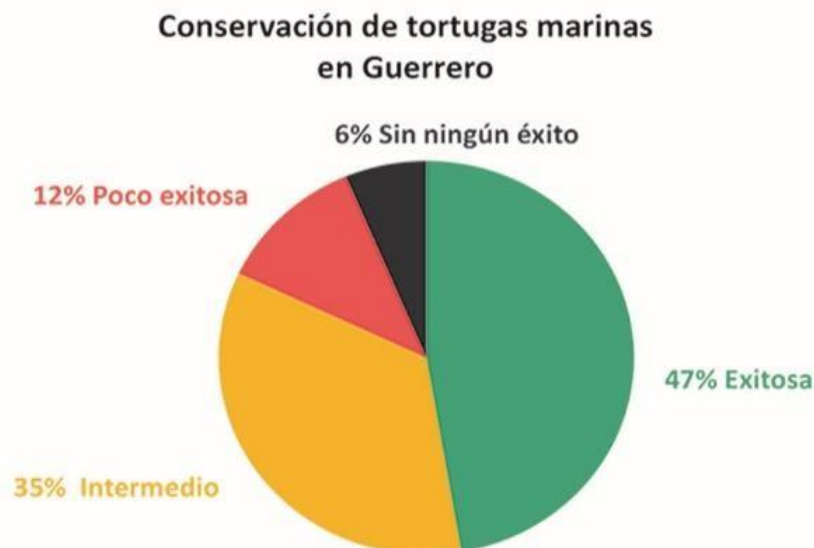


Figura 5. Conservación de tortugas marinas en Guerrero.

Discusión

A pesar de que la presente investigación no profundizó en los problemas y en los conocimientos, y de tener un tamaño de muestra pequeño, creemos que la línea base de este estudio, ofrece una adecuada visión general de temas que son altamente sensibles y difíciles de evaluar, debido a que se seleccionaron algunos actores clave en la protección y conservación de tortugas marinas en el estado de Guerrero. La organización es una fortaleza de los campamentos totugueros, debido a que existe a nivel estatal una Mesa Guerrerense de la Tortuga Marina, cuyas principales funciones son reuniones para establecer acuerdos (plan de trabajo), con respecto a los tramites y permisos de los campamentos tortugueros, solicitar recursos (material y equipo) y establecer mediante el trabajo en equipo la protección y conservación de tortugas marinas. Existe también una mayor organización en comunidades pequeñas, debido a que la mayoría de la gente se conoce. Sin embargo, uno de los problemas que enfrentan, son la presencia de saqueadores que provienen de otros lugares.

Respecto a los recursos humanos, varios campamentos trabajan con ayuda de personal voluntario, como estudiantes de servicio social o estancias (eventuales o de corto plazo), los cuales, a pesar de recibir una capacitación básica, tienen poca experiencia práctica respecto a la protección y conservación de tortugas marinas, a diferencia del personal encargado o responsables técnicos. Un encargado técnico mencionó al respecto, “*si hubiera más personal en los campamentos tortugueros se tendrían mejores resultados de protección y conservación*”. Por otra parte, el personal de los campamentos tortugueros, considera que el gobierno debería brindarle más apoyo económico, mediante salarios (hace años se contaba con el programa de gobierno de empleo temporal) o material y equipo. Esto último debido a que varios campamentos tortugueros no cuentan con instalaciones adecuadas, en algunos casos cuentan con muy poco material y equipo para trabajar, “*se trabaja con lo que se tiene*” (comunicado personal). Sin embargo, algunos campamentos han dejado de operar, por falta de recursos económicos. Respecto a los problemas relacionados con la tramitología, los permisos y

las multas, los actores de la comunidad dicen desconocer los dos primeros, dado que el encargado técnico se encarga de eso. Respecto a las multas, los actores brindaron muy poca información. Sin embargo, en la mayoría de los casos las multas son aplicadas por la falta de incumplimiento de los lineamientos de la NOM-162-SEMARNAT, por ejemplo, funcionar sin autorización o no contar con los permisos correspondientes. Sin embargo, las dependencias mencionaron que han brindado capacitación al personal de los campamentos tortugueros para que no ocurran esta clase de irregularidades.

Donlan *et al.* (2010), realizaron una encuesta por internet para cuantificar la opinión de expertos en tortugas marinas, sobre la magnitud relativa de los riesgos antropogénicos para las poblaciones de tortugas marinas a nivel regional. La captura incidental y el desarrollo costero fueron clasificados con más frecuencia, como los mayores riesgos para las especies de tortugas marinas en una región geográfica. La depredación de los nidos y captura dirigida fue la segunda y tercera amenaza más grande, respectivamente. Sin embargo, la mayoría de los expertos consideran que las tortugas marinas están amenazadas por diversos factores. En el presente estudio, los actores mencionaron que existe una gran depredación de nidos por parte de perros y mapaches, y que se requiere controlar esta clase de depredadores, mientras que respecto a los depredadores de crías liberadas mencionados se encuentran cangrejos y aves. Según Donlan *et al.* (2010), los agentes patógenos se consideran peligrosos e incluso más importantes que el calentamiento global. Sin embargo, en el presente estudio, pocos actores mencionaron algo respecto a estas dos amenazas. Las redes de pesca (captura incidental), son importantes factores de mortalidad de las tortugas marinas (de Oliveira-Braga y Schiavetti, 2013). Sin embargo, en el presente estudio, no se mencionó, probablemente por desconocimiento sobre este problema.

Por otro lado, el saqueo de nidos es una de las causas más importantes de la disminución de las poblaciones de tortugas marinas (Santidrián-Tomillo *et al.*, 2008). Por ejemplo, la combinación de ambos factores causó el rápido declive de tortuga laúd en las costas del Pacífico

mexicano (Sarti-Martínez *et al.*, 2007). Además, hay pocos o ningún procesamiento por coleccionar ilegalmente huevos de tortuga marina, aunque está prohibido por la ley (Tisdell y Wilson, 2005). Hace varias décadas, la caza furtiva de huevos era aproximadamente del 100% de todos los huevos puestos en el Pacífico de México y Costas del Caribe (Sarti-Martínez *et al.*, 2007). Todos los actores reconocieron, que se cuenta con poco personal de vigilancia por parte de la PROFEPA para realizar recorridos a lo largo de todo el estado de Guerrero. Además, debido a la falta de inspección y vigilancia, los actores señalan que ha incrementado el número de personas que recolectan nidos de manera ilegal en las playas. La baja tasa de detección por los inspectores de conservación se debe en gran parte, a la falta de inspectores en ambientes costeros, falta de equipo apropiado para atrapar cazadores furtivos y a la corrupción (Wallace, 2003; Mancini y Koch, 2009). Los impulsores más frecuentes de la caza furtiva son beneficios económicos directos, falta de aplicación de la ley y facilidad de escape o de soborno de autoridades y la fuerte tradición familiar (Mancini *et al.*, 2011). En el presente estudio varios actores de la comunidad y responsables técnicos mencionaron, que antes existía inspección de las playas por parte de la marina y la policía ecológica (protección civil), lo cual hoy en día, es poco frecuente. Para reducir la caza furtiva, es necesario hacer cumplir las leyes ambientales existentes, reducir la aceptación social de la caza de tortugas marinas, educar a la sociedad sobre porque las tortugas marinas son ecológicamente importantes y vulnerables, y mostrarles los beneficios económicos directos de consumo no consuntivo del uso de tortugas marinas (Mancini *et al.*, 2011). Las tortugas marinas son más valiosas vivas que muertas (de Vasconcellos-Pegas *et al.*, 2013; comunicado personal), además, “sin tortugas marinas habría extinción de muchas especies” (comunicado personal). Las prácticas ilegales que permanecen no sólo están asociadas a la falta de opciones de desarrollo socioeconómico, al desconocimiento del marco legal vigente, y a la insuficiente vigilancia en las zonas de anidación, sino también se deben a la falta de educación ambiental y a la presencia de actitudes que se aferran al contexto

económico y al pasado cultural, manteniendo la comercialización de estas especies sin importar su extinción (Malaver, 2008).

Es importante mencionar que la mayoría de los actores solo mencionaron pocos problemas respecto a variables ambientales sobre las tortugas marinas a nivel estatal como: temperaturas elevadas, mareas elevadas, huracanes, lluvias intensas, sequías, y fenómenos como el mar de fondo. La mayoría de los actores no identificaron los impactos del cambio global sobre las tortugas marinas, además de que identificaron muy pocas estrategias de mitigación contra estos impactos. Por ejemplo, la mayoría de los campamentos en Guerrero están optando por técnicas de incubación de nidos para tratar de disminuir la temperatura de la arena, entre estas están el sombreado de los nidos mediante malla sombra o palapa e irrigación de la arena, entre otras. Un problema común en la incubación de nidos en viveros, e incluso en condiciones *in situ* en el estado de Guerrero, que pocos de los entrevistados mencionaron, es el fenómeno de nidos sin desarrollo embrionario, comúnmente conocido como ‘nidos quemados’. Mucha de esta información no es presentada en los reportes de los campamentos tortugueros que son entregados a las dependencias, por ejemplo, muchos campamentos falsifican datos del número de nidos colectados y de crías liberadas. Varios actores mencionaron que los nidos bajo condiciones *in situ* tienen un mayor éxito en comparación de vivero. Sin embargo, debido a la alta depredación y saqueo de nidos es más recomendable trasladarlos a viveros. Otro problema es la NOM-162-SEMARNAT, de la cual varios campamenteros están inconformes, debido a que mencionan que no es tan efectiva dentro de esta región.

El desarrollo del turismo puede tener impactos positivos o negativos en la vida silvestre (Wilson y Tisdell, 2003). Sin embargo, varios estudios señalan que el ecoturismo (turismo basado en la naturaleza), mediante el uso no consuntivo, en tortugas marinas puede beneficiar mediante ingresos directos (Tisdell y Wilson, 2005) a comunidades locales, además de ayudar en la conservación de estas especies (Wilson y Tisdell, 2001; Wilson y Tisdell, 2003; de Vasconcellos-

Pegas *et al.*, 2013). Por lo tanto, es probable que sea sustentable (Tisdell y Wilson, 2002). Esta clase de turismo además resulta beneficioso debido a que involucra la educación ambiental hacia la sociedad en general (Wilson y Tisdell, 2001; Wilson y Tisdell, 2003; de Vasconcellos-Pegas *et al.*, 2013). Desgraciadamente, aun se presenta mucha demanda de este recurso, debido a un problema socioeconómico, como es la falta de empleo, por lo que varias personas dedicadas al saqueo lo hacen por necesidad (Castro-Mondragón *et al.*, 2012), por ello es importante la concientización de la sociedad para evitar el consumo. Actualmente, existe un mayor interés sobre las tortugas marinas (como atracción de turismo) por parte de la comunidad, y de otros prestadores de servicios (servicios como hoteles, restaurantes, renta de cuatrimotos, de caballos, etc.). Varios restaurantes o ramadas ubicadas sobre las playas de las costas de Guerrero (como en las regiones de Costa Chica, Acapulco, Costa Grande), han atraído el turismo, mayormente local (provenientes de municipios cercanos), mediante la liberación de crías de tortugas marinas hacia el mar. Sin embargo, no todas las playas de los campamentos tortugueros son de fácil acceso, y por lo tanto, reciben muy poco turismo. Algunos ingresos generados por turismo pueden ser generados para llevar a cabo investigación, pero también pueden reflejarse en una mayor protección de la playa y hacer frente para reducir varias amenazas que enfrentan las tortugas (Wilson y Tisdell, 2001; Tisdell y Wilson, 2002). Todos los actores mencionan que existe muy poca investigación respecto a tortugas marinas a nivel estatal, además de que la poca que existe no es difundida.

Algunos investigadores, como Márquez-Millán (1996), señalan que, en muchas playas importantes a lo largo de la costa del Pacífico mexicano, la protección de playas de anidación fue operada exitosamente. Sin embargo, los esfuerzos de conservación en México han tenido en general pocos resultados, lo anterior debido a la falta de recursos económicos, humanos y culturales, los cuales son insuficientes para la protección en playas (Peñaflores y Nataren, 1989).

La conservación exitosa de la calidad ambiental y la biodiversidad requiere la consideración de los

aspectos biológicos, sociales, políticos, económicos fundamentales y de componentes culturales y filosóficos de cada país (Tiwarei, 2002; Robinson, 2011). Cuantificar el efecto de los riesgos regionales es particularmente desafiante para especies como las tortugas marinas porque son migratorias, difíciles de estudiar, de larga vida y enfrentan múltiples amenazas antropogénicas (Donlan et al., 2010).

La mayoría de los actores consideran que las temperaturas ambientales del estado de Guerrero son muy elevadas, tanto en condiciones *in situ* como en vivero, por eso consideran que la mayoría de las crías producidas son hembras. Al respecto, un entrevistado mencionó que “*muchos campamentos nada más trabajan por trabajar, a ellos no les interesa si está a una temperatura adecuada*”, y que probablemente debido a esto están causando una afectación sobre los nidos incubados, como, por ejemplo, algunos ocasionan temperaturas más bajas por exceso de sombra o humedad, lo cual alarga el período de incubación de los nidos. La mayoría de los actores mencionaron que no es recomendable la producción de crías sesgada hacia algún sexo, debido a que no se podría efectuar la reproducción o sería más difícil. Los estudios que han evaluado diferentes sitios de anidación han encontrado un sesgo hacia la producción de crías hembras en casi todas las especies de tortugas marinas en todo el mundo (Booth y Astill, 2001; Booth y Freeman, 2006; LeBlanc et al., 2012; Valadez-González et al., 2012; Lolavar y Wyneken, 2015). Varios actores están conscientes que con el aumento de las temperaturas a nivel global el sexo que va a predominar va a ser hembras, lo cual a la larga puede ser un factor que ocasione la extinción más rápida de las tortugas marinas (Katselidis et al., 2012; Patiño-Martínez et al., 2012).

La selección del sitio de anidación en tortugas marinas es determinante para la sobrevivencia de la prole (Ávila-Aguilar, 2015). Muchos de los actores señalaron que es mejor el éxito de incubación en condiciones de vivero debido al manejo adecuado sobre los nidos, desde el traslado correcto en tiempo y forma, hasta el seguimiento de los nidos durante todo el período de incubación (control y seguimiento de la temperatura y la humedad principalmente). Sin

embargo, reconocen que si no se hace un manejo adecuado puede haber problemas o efectos negativos sobre las nidadas. Varios estudios han tratado de disminuir temperaturas elevadas mediante diferentes estrategias de mitigación (Van de Merwe et al., 2006; Patiño-Martínez et al., 2012; Hill et al., 2015; Jourdan y Fuentes, 2015; Esteban et al., 2018). Es importante mencionar, que la mayoría de los campamentos utilizan diferentes técnicas de incubación de nidos esto debido a que consideran que la norma 162 SEMARNAT no es tan efectiva, además de que no están de acuerdo con algunos puntos como, la distancia entre nidos (1 m). Es difícil aplicar la norma de manera homogénea en todo el estado de Guerrero, debido a que como se mencionó anteriormente, varios campamentos utilizan diferentes métodos de incubación de nidos, los cuales ellos consideran son más efectivos o mejores porque producen un éxito de eclosión más alto.

Respecto a la calidad de crías, varios actores señalaron que hay casos de crías deformes, con caparazones aplastados o torcidos, albinismo, les faltan aletas o aletas cortas, de menor tamaño corporal. Por ejemplo, algunos actores mencionaron que las crías son más chicas en condiciones *in situ*, porque son nidos incubados en condiciones más cálidas. Respecto a la calidad de crías bajo condiciones en vivero, creen que en general un mal manejo ocasiona crías de mala calidad, por ejemplo, al tener una cámara del nido mal hecha, con arena muy compactada, o contaminación de la arena. Se sabe que la temperatura de incubación tiene influencia sobre el rendimiento locomotor y morfología de crías de tortugas marinas (Hewavisenthi y Parmenter, 2002; Ischer et al., 2009; Mickelson y Downie, 2010; Maulany et al., 2012; Booth et al., 2013; Sim et al., 2015). Las crías de tortugas marinas nacen con tamaños mayores si son incubadas bajo condiciones más frías (Staines et al. 2019) o de mayor humedad (Erb et al., 2018), por lo tanto, lluvias prolongadas disminuyen la temperatura de la arena, ocasionando influencia indirecta sobre la calidad de crías (Rivas et al., 2018). Por lo tanto, en tortugas marinas, un mayor tamaño de cuerpo de crías, de velocidades terrestres y de natación superiores son importantes para maximizar las

tasas de supervivencia (Booth, 2017; Kobayashi *et al.*, 2017, 2018).

Actualmente, no se tiene conocimiento del nivel de recuperación de las poblaciones de tortugas marinas en Guerrero, también, se desconoce si en verdad se está trabajando correctamente en los campamentos tortugueros a nivel estatal. Se necesita evaluar que estrategias están funcionando y cuales no han sido exitosas, para saber si debemos o no cambiar de estrategias o mejorar las que ya existen. Son necesarios futuros estudios que analicen la magnitud de las debilidades y amenazas para diseñar nuevos programas de conservación de tortugas marinas a nivel estatal o nacional.

Conclusiones

La presente investigación demuestra las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas tanto de la sociedad, de los responsables técnicos de campamentos tortugueros, de las dependencias de gobierno y de la academia. Actualmente, aun se enfrentan muchas debilidades y amenazas en la conservación de tortugas marinas a nivel estatal, las cuales si no se resuelven a tiempo pueden tener consecuencias graves sobre la protección y conservación de tortugas marinas a nivel estatal. Se registró un total de 1 fortaleza, 1 oportunidad, 8 debilidades y 3 amenazas en la protección y conservación de tortugas marinas en Guerrero. La conservación de tortugas marinas en el estado de Guerrero presenta varios desafíos. Además, varios de los responsables técnicos carecen de algunos conocimientos importantes en la conservación de tortugas marinas, como en la proporción de sexo, sobre las variables que determinan un alto éxito de incubación y calidad de crías, y sobre estrategias de conservación. Mientras no se mejoren varios aspectos en la protección y conservación de tortugas marinas a nivel estatal, difícilmente se tendrá una conservación exitosa en un futuro.

La identificación de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas destacadas en este trabajo, sirven para complementar los planes de manejo para las tortugas marinas en la zona y ayuda a fortalecer o crear las estrategias de conservación pertinentes

para estas especies y sus zonas de anidación en Guerrero.

Referencias

- Ávila-Aguilar, A. (2015). Selección de sitios de anidación de *Lepidochelys olivacea* (Testudines: Cheloniidae) en el Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 63, 375-381.
- Balladares, C., Dubois, E. (2014). Saqueo y depredación de nidadas de tortugas marinas, durante las temporadas 2003 a 2012, en seis playas del Golfo de Paria, Venezuela. *Cuadernos de Investigación UNED*, 6, 139-243.
- Booth, D.T., Astill, K. (2001). Temperature variation within and between nests of the green sea turtle, *Chelonia mydas* (Chelonia: Cheloniidae) on Heron Island, Great Barrier Reef. *Australian Journal of Zoology*, 49, 71-84.
- Booth, D.T., Freeman, C. (2006). Sand and nest temperatures and an estimate of hatchling sex ratio from the Heron Island green turtle (*Chelonia mydas*) rookery, Southern Great Barrier Reef. *Coral reefs*, 25, 629-633.
- Booth, D.T., Feeney, R., Shibata, Y. (2013). Nest and maternal origin can influence morphology and locomotor performance of hatchling green turtles (*Chelonia mydas*) incubated in field nests. *Marine Biology*, 160, 127-137.
- Booth, D.T. (2017). Influence of incubation temperature on sea turtle hatchling quality. *Integrative zoology*, 12, 352-360.
- Burger, J., Gochfeld, M. (2014). Avian predation on olive ridley (*Lepidochelys olivacea*) sea turtle eggs and hatchlings: avian opportunities, turtle avoidance, and human protection. *Copeia*, 2014, 109-122.
- Castro-Mondragón, H, Flores-Garza, R, García-Ibáñez, S., Flores-Rodríguez, P. (2012). Evaluación de la extracción furtiva de huevos de *Lepidochelys olivacea* en la zona de patrullaje del centro de protección y conservación de la tortuga marina (UAEM-UAGRO). *Tlamati*, 4, 40-46.
- de Oliveira-Braga, H., Schiavetti, A. (2013). Attitudes and local ecological knowledge of experts fishermen in relation to conservation and bycatch of sea turtles (Reptilia: testudines),

- Southern Bahia, Brazil. *Journal of ethnobiology and ethnomedicine*, 9, 15.
- de Vasconcellos-Pegas, F., Coghlan, A., Stronza, A., Rocha, V. (2013). For love or for money? Investigating the impact of an ecotourism programme on local residents' assigned values towards sea turtles. *Journal of Ecotourism*, 12, 90-106.
- Donlan, C.J., Wingfield, D.K., Crowder, L.B., Wilcox, C. (2010). Using expert opinion surveys to rank threats to endangered species: a case study with sea turtles. *Conservation Biology*, 24, 1586-1595.
- Erb, V., Lolavar, A., Wyneken, J. (2018). The role of sand moisture in shaping loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*) neonate growth in southeast Florida. *Chelonian Conservation and Biology*, 17, 245-251.
- Esteban, N., Laloë, J.-O., Kiggen, F.S.P.L., Ubels, S.M., Becking, L.E., Meesters, E.H., Berkel, J., Hays, G.C., Christianen, M.J.A. (2018). Optimism for mitigation of climate warming impacts for sea turtles through nest shading and relocation. *Scientific Reports* 8, 17625.
- Gaona-Pineda, O., Barragán-Rocha, A. (2016). Las tortugas marinas en México: logros y perspectivas para su conservación. *Soluciones ambientales ITZEN, A.C./Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México*, 228p. [2-20-PB.pdf](#)
- Hamann, M., Godfrey, M., Seminoff, J., Arthur, K., Barata, P., Bjørndal, K.A., Bolten, A., Broderick, A., Campbell, L., Carreras, C., Casale, P., Chaloupka, M., Chan, S., Coyne, M., Crowder, L., Diez, C., Dutton, P., Epperly, S., FitzSimmons, N., Formia, A., Girondot, M., Hays, G., Cheng, I., Kaska, Y., Lewison, R., Mortimer, J., Nichols, W., Reina, R., Shanker, K., Spotila, J., Tomás, J., Wallace, B., Thierry M., Zbinden, N., Godley, B. (2010). Global research priorities for sea turtles: informing management and conservation in the 21st century. *Endangered Species Research*, 11, 245-269. <https://doi.org/10.3354/esr00279>
- Hawkes, L.A., Broderick, A.C., Godfrey, M.H., Godley, B.J. (2007). Investigating the potential impacts of climate change on a marine turtle population. *Global Change Biology*, 13, 923-932.
- Hewavisenthi, S., Parmenter, C. (2002). Incubation environment and nest success of the flatback turtle (*Natator depressus*) from a natural nesting beach. *Copeia*, 2002, 302-312.
- Hill, J.E., Paladino, F.V., Spotila, J.R., Santidrián-Tomillo, P. (2015). Shading and watering as a tool to mitigate the impacts of climate change in sea turtle nests. *PLoS One*, 10, e0129528.e
- Instituto Nacional de Ecología (1990). *Manual de técnicas de manejo y conservación para la operación de campamentos tortugueros*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, México.
- [Detalles de: Manual de técnicas de manejo y conservación para la operación de campamentos tortugueros / Secretaría de Pesca. > Catálogo en línea Koha \(diputados.gob.mx\)](#)
- Ischer, T., Ireland, K., Booth, D.T. (2009). Locomotion performance of green turtle hatchlings from the Heron Island Rookery, Great Barrier Reef. *Marine Biology*, 156, 1399-1409.
- Jourdan, J., Fuentes, M. (2015). Effectiveness of strategies at reducing sand temperature to mitigate potential impacts from changes in environmental temperature on sea turtle reproductive output. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 20, 121-133.
- Katselidis, K.A., Schofield, G., Stamou, G., Dimopoulos, P., Pantis, J.D. (2012). Females first? Past, present and future variability in offspring sex ratio at a temperate sea turtle breeding area. *Animal Conservation*, 15, 508-518.
- Kobayashi, S., Wada, M., Fujimoto, R., Kumazawa, Y., Arai, K., Watanabe, G., Saito, T. (2017). The effects of nest incubation temperature on embryos and hatchlings of the loggerhead sea turtle: Implications of sex difference for survival rates during early life stages. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 486, 274-281.
- Kobayashi, S., Aokura, N., Fujimoto, R., Mori, K., Kumazawa, Y., Ando, Y., Matsuda, T., Nitto, H., Arai, K., Watanabe, G., Saito, T. (2018). Incubation and water temperatures influence the

- performances of loggerhead sea turtle hatchlings during the dispersal phase. *Scientific reports*, 8, 1-9.
- LeBlanc, A.M., Wibbels, T., Shaver, D., Walker, J.S. (2012). Temperature-dependent sex determination in the Kemp's ridley sea turtle: effects of incubation temperatures on sex ratios. *Endangered Species Research*, 19, 123-128.
- Lolavar, A., Wyneken, J. (2015). Effect of rainfall on loggerhead turtle nest temperatures, sand temperatures and hatchling sex. *Endangered Species Research*, 28, 235-247.
- Lutcavage, M., Plotkin, P., Witherington, B., Lutz, P. (1997). Human Impacts on Sea Turtle Survival. In P.L. Lutz, J.A. Musick, J. Wyneken (eds). *The biology of sea turtles*. CRC Press, 387p.
- Malaver, M. (2008). Evaluación de actitudes frente al uso de las tortugas marinas en playa Gandoca. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 55, 29-38.
- Mancini, A., Koch, V. (2009). Sea turtle consumption and black market trade in Baja California Sur, Mexico. *Endangered Species Research*, 7, 1-10.
- Mancini, A., Senko, J., Borquez-Reyes, R., Guzman-Póo, J., Seminoff, J.A., Koch, V. (2011). To poach or not to poach an endangered species: elucidating the economic and social drivers behind illegal sea turtle hunting in Baja California Sur, Mexico. *Human Ecology*, 39, 743-756.
- Márquez-Millán, R. (1996). *Las tortugas marinas y nuestro tiempo*. Fondo de la Cultura Económica, México, 200p.
- Martínez, M., Moreno-Casasola, P., Espejel, I., Orocio, O., Mata, D., Revelo, N., González, J. (2014). Diagnóstico general de las dunas costeras de México. Méx. SEMARNAT. CONAFOR, 350p.
- [DiagnosticodelasdunascosterasdeMexico_Cap_Restauracion.pdf](#)
- Maulany, R.I., Booth, D.T., Baxter, G.S. (2012). The effect of incubation temperature on hatchling quality in the olive ridley turtle, *Lepidochelys olivacea*, from Alas Purwo National Park, East Java, Indonesia: implications for hatchery management. *Mar Biol.* 159, 2651-2661.
- Méndez-Rodríguez, L., Álvarez-Castañeda, S. (2016). Predation on turtle nests in the southwestern coast of the Baja California Peninsula. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87, 483-488.
- Mickelson, L., Downie, J. (2010). Influence of incubation temperature on morphology and locomotion performance of Leatherback (*Dermochelys coriacea*) hatchlings. *Canadian Journal of Zoology*, 88, 359-368.
- National Research Council (1990). *Decline of the sea turtles, causes and prevention*. Whashington, D. C., USA. National academy Press.
- [Front Matter | Decline of the Sea Turtles: Causes and Prevention | The National Academies Press](#)
- Olivier de la Esperanza, A., Arenas-Martínez, A., Tuz, M.T., Pérez-Collazos, E. (2017). Are anthropogenic factors affecting nesting habitat of sea turtles? The case of Kanzul beach, Riviera Maya-Tulum (Mexico). *Journal of Coastal Conservation*, 21, 85-93.
- Patiño-Martínez, J., Marco, A., Quiñones, L., Hawkes, L. (2012). A potential tool to mitigate the impacts of climate change to the Caribbean leatherback sea turtle. *Glob Chang Biol.* 18, 401-411.
- Patiño-Martínez, J., Marco, A., Quiñones, L., Hawkes, L.A. (2014). The potential future influence of sea level rise on leatherback turtle nests. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 461, 116-123.
- Peñaflores, S., Nataren, E. (1989). Resultados de acciones de protección para las tortugas marinas en el estado de Oaxaca. En Secretaría de Pesca. *Tortugas (golfina, laud, lora, blanca, cahuama y Carey)*. Instituto Nacional de Ecología, 57-67.
- Poloczanska, E.S., Limpus, C.J., Hays, G.C. (2009). Vulnerability of marine turtles to climate change. In D.W. Sims (Ed.). *Advances in marine biology*. Burlington, Academic press, Elsevier Ltd., 151-211.
- Rivas, M.L., Spínola, M., Arrieta, H., Faife-Cabrera, M. (2018). Effect of extreme climatic events resulting in prolonged precipitation on the reproductive output of sea turtles. *Animal Conservation*, 21, 387-395.
- Robinson, J.G. (2011). Ethical pluralism, pragmatism, and sustainability in conservation practice. *Biological Conservation*, 144, 958-965.

- Santidrián-Tomillo, P., Saba, V.S., Piedra, R., Paladino, F.V., Spotila, J.R. (2008). Effects of illegal harvest of eggs on the population decline of leatherback turtles in Las Baulas Marine National Park, Costa Rica. *Conservation Biology*, 22, 1216-1224.
- Sarti-Martínez, L., Barragán, A.R, García-Muñoz, D., García, N., Huerta, P., Vargas, F. (2007). Conservation and biology of the leatherback turtle in the Mexican Pacific. *Chelonian Conservation and Biology*, 6, 70-78.
- SEMARNAT (2022). Programa Nacional de Protección, Conservación, Investigación y Manejo de Tortugas Marinas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional de +Áreas Naturales Protegidas.
[Programa-Nacional-De-Conservacion-De-Tortugas-Marinas.pdf \(conanp.gob.mx\)](#)
- Seminoff, J.A., Shanker, K. (2008). Marine turtles and IUCN Red Listing: a review of the process, the pitfalls, and novel assessment approaches. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 356, 52-68.
- Senko, S., Nichols, W.J., Ross, J.P., Willcox, A. (2009). To Eat or not to Eat an Endangered Species: Views of Local Residents and Physicians on the Safety of Sea Turtle Consumption in Northwestern Mexico. *EcoHealth*, 6, 584-595.
- Senko, J.F., Burgher, K.M., Mancha-Cisneros, M.M., Godley, B.J., Kinan-Kelly, I., Fox, T., Humber, F., Koch, V., Smith, A.T., Wallace, B.P. (2022). Global patterns of illegal marine turtle exploitation. *Global change biology*, 28, 6509-6523.
- Sim, E., Booth, D.T, Limpus, C. (2015). Incubation temperature, morphology and performance in loggerhead (*Caretta caretta*) turtle hatchlings from Mon Repos, Queensland, Australia. *Biology Open*, 4, 685-692.
- Staines, M., Booth, D.T, Limpus, C. (2019). Microclimatic effects on the incubation success, hatchling morphology and locomotor performance of marine turtles. *Acta Oecologica*, 97, 49-56.
- Tisdell, C., Wilson, C. (2002). Ecotourism for the survival of sea turtles and other wildlife. *Biodiversity and Conservation*, 11, 1521-1538.
- Tisdell, C., Wilson, C. (2005). Do open-cycle hatcheries relying on tourism conserve sea turtles? Sri lankan developments and economic–ecological considerations. *Environmental management*, 35, 441-452.
- Tiwari, M. (2002). An evaluation of the perceived effectiveness of international instruments for sea turtle conservation. *Journal of International Wildlife Law and Policy*, 5, 145-156.
- Valadez-González, C., Silva-Bátiz, F., Hernández-Vázquez, S. (2012). Proporción sexual en crías de la Tortuga marina *Lepidochelys olivacea*, producida en corral de incubación en la playa de anidación La Gloria, Jalisco, México. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 34, 305-456
- Van de Merwe, J., Ibrahim, K., Whittier, J. (2006). Effects of nest depth, shading, and metabolic heating on nest temperatures in sea turtle hatcheries. *Chelonian Conservation and Biology*, 5, 210-215.
- Wallace, J. (2003). Biology and conservation of sea turtles in Baja California, Mexico. PhD thesis, The University of Arizona.
[Biology and conservation of sea turtles in Baja California, Mexico \(arizona.edu\)](#)
- Wilson, C., Tisdell, C. (2001). Sea turtles as a non-consumptive tourism resource especially in Australia. *Tourism management*, 22, 279-288.
- Wilson, C., Tisdell, C. (2003). Conservation and economic benefits of wildlife-based marine tourism: sea turtles and whales as case studies. *Human Dimensions of Wildlife*, 8, 49-58.

Doi.

Artículo académico

**La comunicación interna como base para fortalecer la cultura organizacional:
un estudio de caso de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción,
Delegación Guerrero**

**Internal communication as a basis for strengthening organizational culture: a
case study of the Mexican Chamber of the Construction Industry, Guerrero
Delegation**

**Comunicação interna como base para o fortalecimento da cultura
organizacional: um estudo de caso da Delegação de Guerrero da Câmara
Mexicana da Indústria da Construção**

Norma Angélica Sevilla-Muñoz* ID. 0000-0003-4380-2049

Claudia Lucero García-Avilés ID. 0000-0002-7352-5970

Jorge Mario Mendoza-Corro ID. 0000-0001-8048-3193

Facultad de Comunicación y Mercadotecnia, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Bachilleres esquina Osa Mayor, Fraccionamiento Villas Caminos Sur, 39097 Chilpancingo, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia nsevillam@hotmail.com

Enviado: 09/02/2024

Revisado: 02/03/2024

Aprobado: 18/05/2024

Publicado: 20/06/2024

Resumen

Se presentan los hallazgos obtenidos a través de la investigación titulada: Estrategias de comunicación interna como base para fortalecer la cultura organizacional; un estudio de caso de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), Delegación, Guerrero, la cual tuvo como objetivo principal diseñar estrategias de comunicación interna que coadyuven al fortalecimiento de su cultura organizacional. Esta investigación fue realizada con una metodología bajo el enfoque cualitativo, aplicando el método de estudio de caso y la utilización de técnicas como la entrevista semiestructurada, la encuesta cualitativa y la observación participante, propias de este enfoque para la recopilación de la información. Entre los principales resultados derivados de esta investigación, se resaltan que la CMIC no gestiona adecuadamente su comunicación interna y en consecuencia se ve afectada su cultura organizacional, además, se evidencia con las debilidades encontradas, una serie de elementos propios de la comunicación interna que se pueden

gestionar de manera adecuada a través de acciones estratégicas que tendrán como resultado un impacto positivo en la organización. Se finaliza la investigación con el diseño de una propuesta de estrategias de comunicación interna para el fortalecimiento de la cultura organizacional de la Cámara para mejorar el trabajo en equipo, elevar la productividad, lograr integrar a los colaboradores y optimizar los resultados corporativos; de esta manera se afirma que una comunicación organizacional interna bien gestionada, es sinónimo de múltiples beneficios que den como resultado una cultura organizacional más sólida.

Palabras claves: Comunicación interna, Comunicación, organizacional, Estrategias de comunicación, Cultura organizacional.

Abstract

In this article, the findings obtained through the research entitled: Internal communication strategies as a basis for strengthening the organizational culture are presented; a case study of the Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), Delegación, Guerrero; which, had as its main objective, to design internal communication strategies that contribute to the strengthening of its organizational culture. This research was carried out with a methodology under the qualitative approach, applying the case study method and the use of techniques such as the semi-structured interview, the qualitative survey and participant observation, typical of this approach for the collection of information. Among the main results derived from this research, it is highlighted that the CMIC does not adequately manage its internal communication and consequently its organizational culture is affected, in addition, it is evident with the weaknesses found, a series of elements of internal communication that they can be adequately managed through strategic actions that will result in a positive impact on the organization. The investigation ends with the design of a proposal for internal communication strategies to strengthen the organizational culture of the chamber to improve teamwork, increase productivity, integrate employees and optimize corporate results; in this way, it is affirmed that a well-managed internal organizational communication is synonymous with multiple benefits that result in a more solid organizational culture.

Keywords: Internal communication, Organizational communication, Communication strategies, Organizational culture.

Resumo

Este artigo apresenta os resultados do projeto de pesquisa intitulado: Estratégias de Comunicação Interna como Base para o Fortalecimento da Cultura Organizacional: Um Estudo de Caso da Câmara Mexicana da Indústria da Construção (CMIC), Delegação de Guerrero. O principal objetivo desta pesquisa foi desenvolver estratégias de comunicação interna para fortalecer a cultura organizacional. A pesquisa empregou uma metodologia qualitativa, utilizando o método de estudo de caso e técnicas como entrevistas semiestruturadas, questionários qualitativos e observação participante, todas características dessa abordagem para coleta de dados. Entre os principais resultados desta pesquisa, destaca-se que a CMIC não gerencia adequadamente sua comunicação interna, afetando consequentemente sua cultura organizacional. Além disso, as fragilidades identificadas revelam uma série de elementos da comunicação interna que podem ser gerenciados de forma eficaz por meio de ações estratégicas, resultando em um impacto positivo na organização. A pesquisa conclui com a elaboração de uma proposta de estratégia de comunicação interna para fortalecer a cultura organizacional da Câmara, melhorar o trabalho em equipe, aumentar a produtividade, integrar os colaboradores e otimizar os resultados corporativos. Essa abordagem afirma que uma comunicação interna bem gerenciada é sinônimo de inúmeros benefícios que resultam em uma cultura organizacional mais forte.

Palavras-chave: Comunicação interna, Comunicação organizacional, Estratégias de comunicação, Cultura organizacional.

Introducción

En las organizaciones, la comunicación es una herramienta imprescindible, pues a través de ella, las entidades pueden ampliar el conocimiento de sus procesos y fortalecer la confianza entre las personas. Además, una gestión adecuada de la información a nivel interno, mediante la creación de acciones estratégicas, logran potenciar el trabajo en equipo, mayor productividad, calidad empresarial e integración de los colaboradores, de esta manera se afirma que una comunicación organizacional interna bien gestionada, fortalece los activos intangibles de las corporaciones como la cultura, la identidad y la marca.

Las cámaras y asociaciones industriales, tienen un papel importante en México, toda vez que representan los intereses legítimos de los sectores comercial y manufacturero, además de estar

inmersas en diferentes áreas de la economía nacional. La CMIC es la organización encargada de representar a las empresas constructoras, por medio de la gestión, asesoría, capacitación, formación profesional e integración de nuevas tecnologías. Hoy cuenta con alrededor de 12 mil empresas afiliadas en 44 delegaciones, siendo Guerrero una de ellas; es por ley un órgano de consulta y colaboración ante los tres niveles de Gobierno, por lo que requiere que su comunicación interna sea gestionada a través de estrategias que mantengan las buenas relaciones con y entre directivos y colaboradores, de esta forma podrán lograrse los objetivos de la CMIC.

Para [Andrade \(2005\)](#), la comunicación interna es *“el conjunto de actividades efectuadas por cualquier organización para la creación y mantenimiento de buenas relaciones con y entre*

sus miembros, a través del uso de diferentes medios de comunicación que los mantengan informados, integrados y motivados para contribuir con su trabajo al logro de los objetivos organizacionales”

Asimismo, [Andrade \(2005\)](#) define la cultura organizacional como “La creación de una serie de significados compartidos, de un lenguaje común, que hace que los integrantes de una organización perciban las cosas de una forma homogénea y, por lo tanto, actúen siguiendo pautas conductuales parecidas” Con estas dos referencias, nos damos cuenta cómo ambas están directamente relacionadas, pudiendo servir como base para fortalecer la cultura organizacional. [Soria \(2008\)](#), señala que la cultura organizacional es un elemento importante para impulsar la competitividad y productividad de la empresa ya que reconoce las capacidades intelectuales, el trabajo y el intercambio de ideas entre los grupos. Al permitir el intercambio de ideas, facilita la realización de las actividades de la empresa, creándose un clima de compañerismo y, al mismo tiempo, de entrega en el trabajo favorable a su nivel de producción.

Basado en lo anterior, la presente investigación buscó los indicadores a través de las pautas conductuales, lo cual propició la creación de estrategias de comunicación interna para fortalecer la cultura organizacional de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.

Materiales y métodos

Enfoque

Esta investigación es descriptiva con un enfoque cualitativo. [Martínez \(2006\)](#) describe a una investigación cualitativa como “*el estudio de un todo integrado que forma o constituye una unidad de análisis y que hace que algo sea lo que es: Una persona, una entidad étnica, social, empresarial, un producto determinado, etc.; aunque también se podría estudiar una cualidad específica, siempre que se tengan en cuenta los nexos y relaciones que tiene con el todo, los cuales contribuyen a darle su significación propia*”

Por consecuencia, este enfoque fue el más adecuado para la investigación, ya que cuenta con las características necesarias para su desarrollo y profundización en el análisis de los datos recolectados.

Premisa

Para la realización de este estudio se determinó la siguiente premisa: La creación de estrategias de Comunicación Interna contribuirá al fortalecimiento de la cultura de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, Delegación Guerrero, de ella se desprende la siguiente tabla de categorías y subcategorías para el análisis de la información.

Método

El método elegido para la realización de esta investigación es el estudio de caso, considerando que el enfoque de la misma es cualitativo, lo que permite examinar el fenómeno más a fondo y así, poder alcanzar un conocimiento profundo del tema. Mediante este método, se recogen de manera descriptiva distintos tipos de informaciones cualitativas que no aparecen reflejadas en números, sino en palabras. Lo esencial en esta

Tabla 1. Categorías y subcategorías de análisis.
Fuente: Elaboración propia.

CATEGORÍA	SUBCATEGORÍAS
Comunicación interna	Mensajes
	Flujos de comunicación (ascendente, descendente, diagonal, vertical,
	Medios de comunicación (convencionales y digitales)
	Gestión de la comunicación interna
	Manejo de la información
Cultura organizacional	Pautas de conductas
	Valores
	Vertiente simbólica (Símbolos, ceremonias, rituales y tradiciones)
	Vertiente mística (mitos, leyendas, historia y héroes)
	Clima laboral

metodología es poner de relieve incidentes clave, en términos descriptivos, mediante el uso de entrevistas, notas de campo, observaciones, grabaciones de vídeo, documentos. Según Stake (2005), la nota distintiva del estudio de casos está en la comprensión de la realidad objeto de estudio *"El estudio de casos es el estudio de la particularidad y de la complejidad de un caso singular, para llegar a comprender su actividad en circunstancias importantes"*

Técnicas de investigación

Entrevista semiestructurada: Este tipo de técnica es muy utilizada en las investigaciones de carácter cualitativo, debido a que presenta para el investigador un espacio donde puede manejar y sondear a los encuestados sin una estructura rígida, Martínez (2006) resalta algunos atributos que tiene el contexto verbal entre dos personas al momento de realizar una entrevista semiestructurada y comenta que *"permite, motivar al interlocutor, elevar su nivel de interés y colaboración, reconocer sus logros, prevenir una falsificación, reducir los formalismos, las exageraciones y las distorsiones, estimular su memoria, aminorar la confusión o ayudarlo a explorar, reconocer y aceptar sus propias vivencias inconscientes"*

De esta manera, la entrevista semiestructurada se aplicó con el diseño de un cuestionario de ocho preguntas de la categoría de Comunicación Interna y ocho preguntas de la categoría de Cultura Organizacional, pero siempre dejando la pauta para profundizar el tema conforme se fue desarrollando la entrevista, así que fue de mucha ayuda, por la manera espontánea de recolectar la información y por el enriquecimiento que los mismos entrevistados dieran posteriormente.

Encuesta cualitativa: En esta técnica los participantes pueden expresar de forma libre sus opiniones respecto algún tema en particular; para su aplicación, el instrumento utilizado fue el cuestionario de encuesta cualitativa. Jasen (2012) comenta que *"el tipo de encuesta cualitativa no tiene como objetivo establecer las frecuencias, promedios u otros parámetros, sino determinar la diversidad de algún tema de interés dentro de una población dada. Este tipo de encuesta no tiene en cuenta el número de personas con las mismas*

características (el valor de la variable) sino que establece la variación significativa (las dimensiones y valores relevantes) dentro de esa población"

El instrumento utilizado en esta técnica, fue el cuestionario con preguntas abiertas; 17 de la categoría de Comunicación Interna y 15 de la categoría de Cultura Organizacional.

Observación participante: Para darle un mayor enfoque a la investigación se requiere que el investigador participe y se mimetice entre los colaboradores, ganándose así su confianza y pasando desapercibido entre ellos para que actúen de forma natural. Martínez (2006) comenta que *"esta es la técnica clásica primaria y más usada por los investigadores cualitativos para adquirir información. Para ello, el investigador vive lo más que puede con las personas o grupos que desea investigar, compartiendo sus usos, costumbres, estilo y modalidades de vida. Para lograr esto, el investigador debe ser aceptado por esas personas, y solo lo será en la medida en que sea percibido como "una buena persona", franca, honesta, inofensiva y digna de confianza"*

Para la observación participante fue necesario que los investigadores utilizaran como instrumento el diario de campo, donde se registraron las actividades más relevantes y que fue conveniente ser tenida en cuenta para la investigación. Esta técnica fue aplicada durante un periodo de tiempo de 6 meses, en el cual se recolectó también la información de las otras técnicas aplicadas, es decir, fueron realizadas a la par.

Muestreo: Se decidió trabajar solo con un número representativo de colaboradores de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, Delegación Guerrero, teniendo en cuenta su ubicación a nivel jerárquico y distribución en las áreas de trabajo, es así como se seleccionaron personas involucradas en cargos como gerencia, jefes de áreas, asistentes y personal encargado de otros servicios.

Para la entrevista semiestructurada, se procedió a entrevistar a dos personas por cada área de trabajo: Gerencia, Comunicaciones y Observatorio, Administración, finalizando con el área de afiliación, teniendo un total de ocho entrevistas, todos los entrevistados con más de diez años de antigüedad en la CMIC.

En la muestra para la aplicación de la encuesta cualitativa se tomó la decisión de hacer partícipes a todos los colaboradores de cualquier área, a excepción de los que habían sido entrevistados, es decir, jefes de áreas, asistentes, auxiliares y demás cargos, esto con el fin de involucrar las diferentes perspectivas de todas las partes que conforman la organización, asimismo, se les informó a todos los participantes que la encuesta era de modo anónimo, con el objetivo de que se sintieran en confianza de poder contestar sinceramente todas las preguntas, además de ser a través de un formulario de Google Drive, lo que facilitó su aplicación. Finalmente, se lograron resultados de las áreas de: Mantenimiento, Conducción y Mensajería, Gerencia, Capacitación, Administración y Finanzas, una aplicación total de veinticinco encuestas.

Resultados

Una vez aplicados los instrumentos de las técnicas implementadas para la investigación, se realizó el procesamiento y análisis de los resultados, los cuales se llevaron a cabo en el orden en que se presentaron las categorías y subcategorías de análisis.

Categoría 1. Comunicación interna

La comunicación interna involucra el conjunto de acciones y actividades efectuadas por cualquier organización para la eficacia en la recepción y la comprensión de los mensajes, a través del uso de diferentes medios de comunicación, logrando fortalecer e incrementar la motivación y la productividad con y entre sus miembros, con el fin de alcanzar los objetivos corporativos, culturales, organizacionales, funcionales, estratégicos y de comportamiento de la empresa (Capriotti, 1998).

Mensajes. Para el análisis de esta subcategoría se tomaron en cuenta tres interrogantes claves, la idea principal es saber el nivel de conocimiento de los colaboradores acerca de los mensajes enviados o recibidos dentro de la institución; en el primero se abordaron los tipos de mensajes que identifican y reciben normalmente en un día trabajo, es decir, los relacionados con los productos y/o servicios, actividades que deben realizar: los de capacitaciones, orientaciones,

resolución de problemas, generación de nuevas ideas, órdenes, procedimiento, controles para facilitar el movimiento en la organización y en el último grupo los de elogios, los motivacionales, de las actividades informales (charlas, almuerzos, actividades sociales, de integración) y de sesiones de asesoramiento.

En la segunda interrogante, se indagó acerca de cuál de estos tipos de mensajes anteriormente mencionados les gusta recibir, y en la tercera interrogante de esta subcategoría se abordó el nivel de claridad con la que se logran entender los mensajes y las consecuencias de no poder hacerlo. Los resultados de la primera subcategoría arrojan que cada uno de los entrevistados y participantes tienen el conocimiento de lo que significa un mensaje, también identifican que los que más reciben a diario son los de productos y servicios, capacitaciones y resolución de problemas, así como los de órdenes y algunos de tipo motivacional, ¿cómo se logra evidenciar la mayoría de mensajes que dicen recibir los empleados en la organización son de tipo “acción” y pocos de motivación?

Flujos de comunicación. Los flujos de comunicación en la organización, son redes que determinan en gran parte el éxito o fracaso de las organizaciones para esta subcategoría, se analizaron los aspectos relacionados con estos. Una de las interrogantes predominantes en este apartado, fue la de las relaciones entre los puestos jerárquicos, aquí la respuesta predominante es que existe una buena trato de jefe a subordinado y viceversa, pero cuando la pregunta cambió a cómo se relacionaban entre grupos o áreas, una parte de los entrevistados y participantes respondió que existía una relación cordial y otros estrictamente profesional, tomando en cuenta que en todos los grupos de personas este tipo de comportamiento es algo recurrente, ya que por afinidades se crea más cercanía con una persona que con otra “*En general la relación con algunas personas en particular no pasa de ser únicamente cordial por ciertas diferencias de pensamientos, creencias, edades, que hacen un poco más estática la relación, no saldría a tomarme un café con ellas porque al final del día sólo son compañeras del trabajo*”

Por otro lado, cuando se les preguntó por la relación interna entre áreas, las respuestas fueron muy positivas, pues alegaron que por cercanía y una mayor convivencia se han creado lazos más fuertes basados en la confianza y la amistad. Se hace evidente entre los entrevistados la admiración que sienten por la relación que tiene la gerencia con los demás departamentos y resaltan la complicidad del área contable.

En relación a la pregunta ¿Qué harías tú para mejorar la comunicación interna?, las respuestas dieron ideas realizables que se deben considerar para la creación de estrategias, una de las más predominantes fueron las convivencias y capacitaciones acerca del trabajo en equipo, asimismo, más reuniones rápidas de apertura o cierre de semana *“Una convivencia extra-oficial, porque cuando se dan este tipo de convivencias las personas se muestran tal y como son”, “sería bueno traer más cursos que nos ayuden al trabajo en equipo, yo he visto que cuando hemos tenido los cursos de integración de trabajo en equipo, de apoyarnos, de motivarnos de ese tipo de temas, he visto que nos ha ayudado”, “la verdad cuando se hacen cursos para fortalecer algún tema en específico y lo hacemos en horas extras, los colaboradores se sienten obligados y no quieren asistir, pero si fuera en el horario de trabajo sí asisten”*

Medios de comunicación (convencionales y digitales). La función principal de los medios o canales de comunicación es tender puentes entre personas y/o áreas de la organización para lograr transmitir un mensaje de forma clara, precisa y eficiente. Para esta subcategoría, se emplearon tres interrogantes que hacen referencia a los medios de comunicación más utilizados dentro de la organización, los que consideraban más importantes y conocer cuál es el más efectivo de todos, los resultados arrojados logran evidenciar que la red social WhatsApp, es el medio más apto para comunicarse, por la inmediatez de la información y su réplica, en segunda instancia consideran las reuniones y llamadas telefónicas como otra opción viable para recibir algún tipo de información, y en tercer lugar colocan al correo electrónico, considerando que continúa siendo una herramienta muy útil para enviar información importante y le restan un poco de importancia a

las circulares físicas o a los anuncios en los tableros *“El WhatsApp me gusta más por su rapidez, ya que ahí me doy cuenta si me ignoran, al igual a mí me sirve como medio de comprobación o evidencia para decir que convoqué a algo o que pasé una información”*

Gestión de la comunicación interna. La presente categoría, evaluó la opinión que tienen los colaboradores acerca del departamento de comunicación, el plan de comunicación y los temas e información que normalmente comparte la empresa; para empezar, se encontró que el departamento de comunicación de la CMIC tiene una excelente aceptación, a pesar de que es manejado por una sola persona, la mayoría de los colaboradores piensa que su función es primordial e indispensable *“Siento que es una parte fundamental, para mí es primordial darle la importancia que tiene en el mercado actual, la mayoría de las empresas ya tienen un área encargada para este fin, y aquí en la CMIC la tenemos y la persona que está a cargo, la desempeña muy bien, el manejo que le da a las redes sociales, los comunicados, la dirección de los eventos es muy buena y se ve su trabajo”*

Manejo de la información. Comunicar la información en el momento adecuado y de forma clara, puede evitar la creación de rumores que puedan generar una crisis dentro de una organización, por lo cual, se indagó entre los colaboradores acerca de cómo reaccionan ante los rumores o posibles crisis, y cómo ellos pueden evitar que estos fenómenos se presenten en la entidad. La respuesta por parte de los entrevistados y los participantes es que generalmente cuando escuchan un rumor del ámbito laboral, tratan de preguntárselo a su jefe directo o en su defecto a la gerente, de esta manera evitan los murmullos y los malos entendidos, otros, por el contrario, se dirigen hacia la persona que empezó el comentario (rumor) y lo confrontan *“Todo depende de qué tipo de información sea, me gusta ser muy claro y preciso porque debo ser imparcial con el personal, no tener favoritos en ese momento, pero saber la información completa, averiguar de dónde surgió el tema o porque se está diciendo esto o lo otro”, “es difícil que no existan rumores en una empresa, ya que en nuestras casas también los hay, de mi parte*

jamás saldrá un rumor por más que quieran sacarme información”

Dentro de las ideas que expusieron para los rumores que puedan generar crisis, está la de “que se hable abiertamente de los temas en reuniones extraordinarias o en las ya programadas, igual que evitar reproducir los rumores y acercarse a la persona más idónea que pueda orientarlos”.

Categoría 2. Cultura organizacional

“Toda organización posee una declaración fundacional, una ética, unos principios rectores de su actividad, unos valores, que junto a las presunciones básicas y creencias constituyen el núcleo fundamental de toda cultura organizativa” (López-Felipe, 2013).

Pautas de conductas. Capriotti (2009), define este conjunto de atributos dentro de la empresa como pautas de conducta y afirma que: *“Las Pautas de Conductas son los modelos de comportamientos observables en un grupo amplio de miembros de la organización”* Para esta subcategoría, se realizó la pregunta, ¿Cambiarías algo de la filosofía empresarial que fomenta la CMIC?, la respuesta fue contundente, toda vez que los colaboradores opinan que la misión y la visión que la organización promueve están obsoletos, que muchos de sus objetivos se alcanzaron ya hace muchísimo tiempo *“Pienso que se debe actualizar y la enfocaría hacia las nuevas tecnologías, aunque la visión ya trae este apartado, pienso que ya alcanzamos nuestra misión y la visión se convirtió en nuestra misión, es decir, debemos crear una nueva visión, habría que reestructurarse esta filosofía de la empresa”* Otros, por el contrario, no logran recordar la filosofía empresarial y comentan que alguna vez se la aprendieron porque necesitaban certificarse, pero en este momento no se acuerdan a qué hace referencia. De esta forma, queda en evidencia que la falta de actualización y de promoción de la filosofía corporativa entre los colaboradores, hace que pierda sentido y que no sea sinónimo de motivación para ellos.

Otro elemento a analizar en esta subcategoría se refiere a cómo ven los colaboradores el comportamiento de sus compañeros dentro de la organización, la respuesta que se repite más es la de que todos tienen un comportamiento cordial y

profesional, pero que en ocasiones infringen normas que podrían convertirse en algo molesto para algunos, como, por ejemplo, el llegar de manera impuntual a la oficina ha sido un detonante de quejas por parte de los que sí cumplen el horario establecido, *“no existe ningún tipo de corrección fuerte para este incumplimiento, solo llamados de atención y en ocasiones por tener un vínculo más cercado con el superior no pasa nada”*

El último punto que se indagó en esta subcategoría fue el de fortalecer una pauta de conducta dentro de la organización, los resultados permearon en el fortalecimiento del trabajo en equipo, mejorar la convivencia entre áreas y el cumplimiento del horario, fueron algunas de las pautas más expuestas, este último, sin duda, es el que se siente como prioridad *“El compromiso y la responsabilidad, es primordial sobre todo en el horario de llegada, pero también es un tema donde a la gerencia le gana el corazón y no hace los llamados de atención que debería hacer y es ahí donde la mayoría se aprovecha para faltar a esta pauta”*

Valores. Se indagó entre los colaboradores acerca de la identificación de los valores institucionales de la CMIC, cómo los promueve y qué tanto están alineados con los que consideran importantes en sus vidas. Como primera respuesta se evidencia que los colaboradores conocen muy poco los valores que la CMIC contempla en su filosofía, otros, por el contrario, lograron mencionar algunos de ellos, pero ninguno los puede identificar completamente, a través de la observación, se detectó que recientemente la CMIC cambió sus valores institucionales, pero solo fueron expuestos en la página web y no comunicados a los colaboradores como debería ser *“Honestamente en estos momentos no sé cuáles son, porque hace poco los cambiaron, recuerdo los antiguos porque alguna vez los repasamos y eso es culpa de alguien de arriba que no nos dice de esos cambios y que no los explique de esa forma”*

Vertiente Simbólica (Símbolos, ceremonias, rituales y tradiciones). Las características que guían esta subcategoría están representadas por aquellas figuras consideradas símbolos relevantes de la organización, asimismo están las

ceremonias, rituales y tradiciones que se celebran en diferentes épocas del año.

Los colaboradores de la CMIC consideran a su logotipo como el símbolo más valioso y representativo que tiene la empresa *“Para mí el logo es muy importante, porque es el que nos identifica con el exterior”* Otros llegaron a mencionar que el casco de seguridad que usualmente utilizan las personas dentro de una construcción es también un símbolo de la empresa, la realidad es que el logotipo es sin duda el más representativo de la CMIC.

Todos los entrevistados y participantes, tienen en claro las tradiciones que se celebran en la organización, entre las más mencionadas están: el Día de la Santa Cruz, el aniversario de la CMIC, los festejos de Navidad y el Día de la Independencia. En la pregunta, ¿qué tanto participan en ellas?, la respuesta de la mayoría es que sí lo hacen con todo el sentido de pertenencia, pero en algunos casos opinan que muchas veces se sienten obligados a asistir y no porque les guste estar ahí *“Sí participo en todas las tradiciones y me gustan todas, algunas sí son obligatorias venir a apoyar, aunque no te guste mucho”*

Vertiente Mística (Historias, mitos, leyendas y héroes) Se recopiló la información respecto de todas aquellas narrativas propias de las empresas y de personajes representativos, es decir, las mitos, leyendas, historias y héroes. Dentro de este apartado se logra identificar que los colaboradores de la CMIC desconocen algún mito o leyenda en torno de la empresa *“Nunca he conocido una leyenda o mito de la cámara, siento que me hace falta investigar más ya que nunca me habían preguntado eso”* Esto refleja que en la organización no existe algún registro o memoria que contemple este aspecto.

En cuanto a la historia de la organización, que es otro elemento de suma importancia a considerar para esta subcategoría, los colaboradores más antiguos respondieron que tienen conocimientos amplios de cómo se creó la CMIC, sin embargo, la realidad es que con el pasar del tiempo esa historia ha perdido importancia, esto se evidenció en las respuestas con poco fundamento que entregaron los participantes y entrevistados *“La CMIC ha crecido con el tiempo, ya que cuando yo entré, éramos muy*

poquitos trabajadores, solo estaba gerencia, afiliación y recepción, funcionaban juntas, contabilidad, asistente de capacitación y asistente de gerencia junto con el de la limpieza, anteriormente los cursos y las capacitaciones eran pocos, con el paso de los años esto va creciendo, asimismo hay nuevas fuentes de ingresos como lo es el Coworking, cada comité ha hecho su parte para que la organización crezca”

Clima laboral. Chiavenato (2000), “arguye que el clima organizacional puede ser definido como las cualidades o propiedades del ambiente laboral que son percibidas o experimentadas por los miembros de la organización y que además tienen influencia directa en los comportamientos de los empleados”

Para esta subcategoría se tomó en cuenta la opinión que tienen los colaboradores acerca de cómo es el clima laboral *“Se podría decir que si una persona de afuera nos viera diría, ¡wow!, que bien se ven como equipo, pero la realidad es otra, aunque de manera general existe una relación muy cordial entre todos, pero ya si es de manera personal, sí existen algunas rencillas entre ciertas personas”*

Discusión

La importancia de la gestión de la comunicación interna radica en la creación de estrategias planificadas, alcanzables y medibles; saber cómo llegar a todos los actores que integran la organización. Charry-Condor (2018) opina que *“la comunicación interna debe ser gestionada intencionalmente, es decir que se produzca con una previa planificación. Para ello deberá tener objetivos y resultados claros y concretos. La comunicación interna debe ser una herramienta sistémica organizativa que permitirá ser más eficientes y efectivos”*

Queda claro que en la CMIC, Delegación Guerrero, hace falta crear estrategias de comunicación interna que les permita mejorar en sus procesos, gestionarla producirá una mayor efectividad y claridad que servirá como base para consolidar su cultura organizacional, debido a que, aunque existen muchas fortalezas en lo que concierne al proceso de comunicación, es evidente que persisten algunas falencias, las

cuales deben ser atendidas a la brevedad posible para que así puedan desarrollarse de forma adecuada, porque de no hacerlo podrían comprometer otros aspectos importantes dentro de la organización, como su identidad, su imagen, su clima y, por supuesto, la cultura organizacional; teniendo identificados estos aspectos se pueden convertir en áreas de oportunidad para la organización a través de la creación de estrategias que logren fortalecer su comunicación interna y, a su vez, su cultura organizacional.

Estas estrategias deberán estar dirigidas hacia el interior de la organización, toda vez que quiénes son el motor de todo este engranaje llamado CMIC, comenzando, entonces, desde la reestructuración de la filosofía organizacional, pasando de la misma manera por el reconocimiento y asimilación de los valores organizacionales, siguiendo con la promoción de las vertientes simbólicas y místicas de la empresa, tomando en cuenta el fortalecimiento de los lazos afectivos y de convivencia, todos estos aspectos trabajados de una forma sencilla y creativa, pueden llegar a convertirse en ese punto diferenciador y clave que hace que la cultura organizacional en una empresa se mantenga, consolide y perdure.

Dicho lo anterior, se presenta a continuación una propuesta para el fortalecimiento de la comunicación interna y la cultura organizacional de la CMIC, Delegación Guerrero, con los objetivos, las estrategias y acciones a implementar.

Objetivo general

Crear estrategias de comunicación interna que contribuyan en el fortalecimiento de la cultura organizacional de la CMIC, Delegación Guerrero.

Objetivos específicos

1. Institucionalizar nuevos conocimientos referente a la filosofía organizacional;
2. Crear una memoria escrita donde se contemple la vertiente mística de la empresa;
3. Promover la vertiente simbólica de la empresa entre los colaboradores;
4. Fortalecer los lazos afectivos y de convivencia entre los colaboradores;

5. Mejorar los canales de comunicación interna;
6. Medir el nivel de comunicación interna;
7. Incrementar la motivación de los trabajadores y el trabajo en equipo;
8. Crear un plan de comunicación interna para la organización.

Propuesta para el fortalecimiento de la comunicación interna y la cultura organizacional de la CMIC, Delegación Guerrero

Estrategia 1: Actualizar y fomentar la filosofía empresarial para la CMIC, Delegación Guerrero.

Objetivo específico: Institucionalizar nuevos conocimientos referente a la filosofía organizacional.

Acciones

Crear una nueva misión y visión que refleje los objetivos actuales de la organización y que sea motivadora para los colaboradores.

Analizar los nuevos valores impuestos por la CMIC México y evaluar si son congruentes con la nueva misión y visión.

Renovar el propósito empresarial con nuevos objetivos.

Realizar actividades de capacitación que permitan a los trabajadores de la CMIC entender e interiorizar su corazón ideológico, traduciendo en actitudes y acciones concretas dentro de sus funciones laborales.

Estrategia 2: Recopilación, transcripción y presentación de las historias, leyendas, mitos y héroes más representativos que ha tenido la CMIC.

Objetivo específico: Crear una memoria escrita donde se contemple la vertiente mística de la empresa.

Acciones

Realizar mesas de trabajo donde se puedan generar espacios para compartir las historias, leyendas, mitos y héroes más representativos que ha tenido la CMIC desde sus inicios (se deben incluir terceras personas que puedan hacer aportes significativos a esta acción).

Transcribir las historias, leyendas, mitos y héroes más representativos que ha tenido la

CMIC desde sus inicios y guardarlos en una memoria de forma física y digital.

Realizar la presentación oficial ante todos los interesados (Colaboradores, Afiliados y público externo de la CMIC) de la recopilación de las historias, leyendas, mitos y héroes en forma física (libro, revista, flyer) y digital (e-book, artículo, infografía, video, podcast).

Estrategia 3: Fortalecer la importancia que tiene la identidad gráfica de la CMIC entre los colaboradores.

Objetivo específico: Promocionar la vertiente simbólica de la empresa entre los colaboradores.

Acciones

Realizar una capacitación donde se refuerce todo lo concerniente al significado del logotipo de la CMIC (símbolo y colores institucionales).

Promover y fomentar el lema de la CMIC, Delegación Guerrero, “Construyamos juntos”.

Estrategia 4: Campaña de sensibilización “Somos familia CMIC”

Objetivo específico: Fortalecer los lazos afectivos entre los colaboradores.

Acciones

Por medio del área de comunicación en conjunto con la gerencia se diseñará una campaña de sensibilización que apunte a fortalecer lazos afectivos y de convivencia entre los colaboradores. (Se debe contemplar disposición de tiempos y costos).

Presentación y sensibilización de la campaña ante su público estratégico.

Ejecución y puesta en marcha de la campaña.

Evaluación de los resultados obtenidos y nuevas posibles propuestas.

Estrategia 5: Diversificar eficientemente los canales de comunicación interna, seleccionando las herramientas más efectivas.

Objetivo específico: Mejorar los canales de comunicación interna.

Acciones

Utilizar las nuevas tecnologías para mejorar la comunicación interna, a través de chats internos, redes sociales, correo electrónico, siempre

dependiendo del público y del mensaje será el medio elegido.

Impulsar la interacción digital entre los trabajadores.

Impulsar un buzón de sugerencias interno para evitar rumores.

Aumentar las reuniones generales para aclarar rumores y ahí comunicar con verdad y transparencia.

Estrategia 6: Establecer las métricas adecuadas que sirvan para saber cuál es el estado de la comunicación interna, la cultura y sobre todo cómo las perciben los trabajadores.

Objetivo específico: Medir el nivel de comunicación interna y cultura.

Acciones:

Definir las métricas que se utilizarán para medir el nivel de la comunicación interna y el estado de la cultura, combinando cuantitativas y cualitativas.

Definir la periodicidad de estas métricas.

Dar a conocer los resultados al cuerpo directivo para tomar decisiones al respecto

Estrategia 7: Fomentar la colaboración, motivación e innovación entre los colaboradores.

Objetivo específico: Incrementar la motivación de los trabajadores y el trabajo en equipo.

Acciones:

Reconocer los éxitos y altos desempeños de los empleados a través de algunos incentivos no necesariamente económicos, si no honoríficos, el empleado del mes, un día de descanso por llegar temprano todo el mes, etc.

Capacitar e integrar equipos de trabajo sólidos y eficaces.

Flexibilizar el contacto entre departamentos para fortalecer el intercambio de ideas y de información entre colaboradores.

Promover actividades sociales, culturales y deportivas internas para fomentar el compañerismo y la motivación.

Enviar felicitaciones personalizadas por cumpleaños o fechas especiales, como día de las madres, de la mujer, del hombre, de la familia, etc.

Estrategia 8: Creación e implementación de un plan de comunicación interna, que contemple el diseño de estrategias para fortalecer la comunicación y cultura al interior de la cámara.

Objetivo específico: Crear un plan de comunicación interna para la organización.

Acciones:

Determinar el estado de la comunicación interna.

Crear del plan a través de estrategias de fortalecimiento de comunicación interna.

Presentación y ejecución del plan.

Evaluación del Plan

Conclusiones

Para finalizar, se concluye que el proceso de comunicación interna en la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción CMIC, Delegación Guerrero, no está siendo gestionado de una manera adecuada, puesto que elementos importantes como los mensajes, los flujos, medios de comunicación, manejo de la información, la motivación, el reconocimiento, el trabajo en equipo, entre otros, están descuidados y rezagados en el tiempo por usos y costumbres, o simplemente por el pensamiento coloquial “todo está bien porque nadie se queja”, esto sucede debido a que desde hace mucho tiempo no se realiza ninguna acción para promoverlo o fortalecerlo. Esta afirmación se sustenta en todo lo expresado por los colaboradores, y queda por sentado que la CMIC Delegación Guerrero deberá implementar estrategias que apunten al fortalecimiento de su comunicación interna, de igual manera, pensar cómo estas estrategias pueden ser el trampolín que ayude a impulsar otros activos intangibles trascendentales como la identidad corporativa, la imagen, el clima y la cultura organizacional.

Cabe recordar que la cultura organizacional está compuesta por diferentes elementos que hacen de ella una parte esencial dentro de cualquier organización, con este estudio se demostró que la filosofía empresarial de la CMIC Delegación Guerrero, está desgastada por el paso del tiempo y por consiguiente ha perdido importancia entre sus colaboradores, a tal punto que ellos no se sienten identificados con su corazón ideológico (misión, visión, valores), otro aspecto de la

filosofía que hay que fortalecer, son los valores que la integran, debido a que hace más de un año la CMIC México decidió cambiarlos y nunca los socializó con los empleados de la Delegación Guerrero, por lo que ellos no se identifican con estos valores debido al desconocimiento de los mismos.

Queda claro que la CMIC delegación Guerrero cuenta con muchas fortalezas para la consecución de objetivos, una de ellas, es la disposición de la gerencia para buscar estrategias que promuevan y fomenten cambios positivos en la organización, sin mencionar que cuenta con un espacio físico totalmente equipado para la realización de las tareas diarias, sin embargo, se encontraron varias áreas de oportunidad que a través de las estrategias de comunicación y acciones establecidas en la propuesta presentada se lograrán mejorar.

Finalmente, queda de manifiesto que las organizaciones contemporáneas deben planificar sus acciones de comunicación para incidir en los intangibles estratégicos como la identidad, la imagen, la marca, la cultura, entre otros, por lo que dentro de las estrategias propuestas se encuentra la elaboración de un “Plan de Comunicación Interna”, que oriente las diversas actividades que se deben realizar para el fomento y fortalecimiento de la cultura CMIC, así como la implementación de métricas que permitan valorar el estado de la cultura y comunicación interna para verificar el impacto de las acciones que se desarrollen y sirva para la toma de decisiones a este respecto.

Agradecimientos

Agradecemos a las y los trabajadores de la CMIC que colaboraron en el presente estudio, asimismo a la gerente y presidente por el acceso a la información institucional.

Referencias

- Andrade, H. (2005). Comunicación organizacional interna: proceso, disciplina y técnica. Editora Cristina Seco. Gesbiblo, S.L España, 122p.
[Comunicación Organizacional Interna: Proceso, Disciplina y Técnica - Horacio Andrade - Google Books](#)

- Capriotti, P. (1998). La comunicación interna. Capacitación y Desarrollo, 13, 5-7.
- Capriotti, P. (2009). Branding corporativo: fundamentos para la gestión estratégica de la identidad corporativa. Business School Universidad Mayor, 273p.
[Branding corporativo: fundamentos para la gestión estratégica de la ... - Paul Capriotti - Google Books](#)
- Charry-Condor, H.O. (2018). La gestión de la comunicación interna y el clima organizacional en el sector público. Comunic@ción, 9, 25-34.
- Chiavenato, I. (2000). Administración de recursos humanos. Mc Graw Hill, 699p.
[Administración de recursos humanos - Idalberto Chiavenato - Google Books](#)
- Fernández, C. (2012). La comunicación en las organizaciones. Ed. Trillas, 320p.
[LA COMUNICACION EN LAS ORGANIZACIONES. FERNANDEZ COLLADO, CARLOS / Escritor. 9786071711458 Editorial Trillas \(etrillas.mx\)](#)
- Jasen, H. (2012). La lógica de la investigación por encuesta cualitativa y su posición en el campo de los métodos de investigación social. Paradigmas, 4, 39-72.
- Martínez, M. (2006). La investigación cualitativa (Síntesis Conceptual). IIPSI, 9, 123-146
[psicologia ok.pdf \(unmsm.edu.pe\)](#)
- López-Felipe, M. (2013). La cultura organizativa como herramienta de gestión interna y de adaptación al entorno. Un estudio de casos múltiple en empresas murcianas. Tesis doctoral, Universidad de Murcia, 1106p.
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/117203/TESIS.pdf?sequence=>
- Soria, R. (2008). Emprendurismo, cultura, clima y comunicación organizacional y su aplicación a la pequeña y mediana empresa en la Zona Metropolitana de Guadalajara, México. España: Red Académica Iberoamericana Local-Global, Grupo EUMEDNET Universidad de Málaga.
[Emprendurismo, cultura, clima y comunicación organizacional y su aplicación| Libros Eumed.net](#)
- Stake, R.E. (2005). Investigación con estudio de casos. 3ª Edición, Ediciones Morata, 159p.
[Investigación con estudio de casos - Robert E. Stake - Google Books](#)

Doi.

Artículo de investigación

Un modelo de mezclas Bayesiano para describir rebrotes del COVID-19 en el estado de Guerrero, México

A Bayesian mixture model to describe COVID-19 outbreaks in the state of Guerrero, Mexico

Um modelo de mistura Bayesiana para descrever surtos de COVID-19 no estado de Guerrero, México.

Yaineris Ferrán-Yera ID. 0000-0002-7851-8198

Francisco J. Ariza-Hernández* ID. 0000-0002-1414-8490

Martín P. Árciga-Alejandro ID. 0000-0002-1637-8513

Jorge Sánchez-Ortiz ID. 0000-0002-9228-7285

Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas S/N. Ciudad Universitaria Sur, 39086, Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia arizahfj@uagro.mx

Enviado: 03/02/2024

Revisado: 06/03/2024

Aprobado: 08/05/2024

Publicado: 15/06/2024

Resumen

El COVID-19 ha puesto en alerta al mundo entero debido al gran número de contagios, hospitalizaciones y defunciones provocadas. Desde su inicio, en diciembre de 2019, han estado ocurriendo “olas” de incrementos considerables del número de contagios y muertes, conocidos como rebrotes. En este trabajo, se modela matemáticamente el comportamiento diario de infecciones, hospitalizaciones y defunciones por COVID-19 en el estado de Guerrero del 15 de marzo de 2020 al 27 de febrero de 2022, haciendo uso de un modelo de mezclas Bayesiano con distribuciones gaussianas. Se estimaron los parámetros de interés involucrados en el modelo mediante el método Bayesiano, se obtuvieron las distribuciones posteriores de cada uno de ellos usando Cadenas de Markov vía Monte Carlo y se validaron las estimaciones con los análisis de convergencia correspondientes. Con el modelo de mezclas se identificaron cinco rebrotes para los casos infectados, y cuatro para los hospitalizados y defunciones. Finalmente, la implementación del modelo se realizó con la ayuda del software estadístico R y el paquete JAGS.

Palabras clave: Mezcla de distribuciones, Cadenas de Markov, Monte Carlo, Estimación Bayesiana, Rebotes de COVID-19

Abstract

The COVID-19 pandemic has put the entire world on alert due to the large number of infections, hospitalizations, and deaths caused by this disease. Since its beginning, in December 2019, outbreaks of considerable increases in the number of infections and deaths, have been occurring. In this work, the daily behavior of infections, hospitalizations, and deaths from COVID-19 in the state of Guerrero is mathematically modeled using a Bayesian mixture model with Gaussian distributions from March 15, 2020 to February 27, 2022. The parameters of interest were estimated using the Bayesian method, the posterior distributions of each of them were obtained using Markov Chains via Monte Carlo and the estimates were validated with the corresponding convergence analyses. With the mixture model, five outbreaks were identified for infected cases, and four for both hospitalized and deaths cases. Finally, the implementation of the model was carried out with the help of the R statistical software and the JAGS package.

Keywords: Mixture of distributions, Markov Chain, Monte Carlo, Bayesian estimation, COVID-19 outbreaks.

Resumo

A COVID-19 colocou o mundo inteiro em alerta devido ao grande número de infecções, hospitalizações e mortes que causou. Desde o seu início, em dezembro de 2019, houve ondas sucessivas de aumentos consideráveis no número de infecções e mortes, conhecidas como surtos. Este artigo modela matematicamente o comportamento diário das infecções, hospitalizações e mortes por COVID-19 no estado de Guerrero, de 15 de março de 2020 a 27 de fevereiro de 2022, utilizando um modelo de mistura Bayesiano com distribuições Gaussianas. Os parâmetros de interesse envolvidos no modelo foram estimados utilizando o método Bayesiano, as distribuições posteriores de cada um foram obtidas utilizando cadeias de Markov via Monte Carlo, e as estimativas foram validadas com as respectivas análises de convergência. O modelo de mistura identificou cinco surtos de infecções e quatro de hospitalizações e mortes. Finalmente, o modelo foi implementado utilizando o software estatístico R e o pacote JAGS.

Palavras-chave: Mistura de distribuições, Cadeias de Markov, Monte Carlo, Estimação Bayesiana, surtos de COVID-19

Introducción

La pandemia por COVID-19 ha puesto en alerta al mundo entero desde su aparición en diciembre del 2019 en la ciudad de Wuhan, China, se estima que alrededor de 235,667,597 personas han sido infectadas y 3,924,164 han muerto en todo el continente americano por esta enfermedad; tan solo en México, se tiene el dato de 7,450,992 infectados y 332,986 muertes reportados oficialmente hasta febrero de 2023 (PAHO, 2020) y en el estado de Guerrero se reportan 118,827 infectados y 6,878 defunciones. A pesar de todas las investigaciones médicas y estrategias trazadas para contener el contagio, en determinados momentos han ocurrido “olas” de incremento considerables del número de casos y defunciones, a estas etapas de transición de la pandemia se le conoce como rebrotes. Dichos rebrotes se pueden describir matemáticamente como curvas con características o especificaciones diferentes tanto en intensidad como duración en el tiempo. Las contramedidas de salud pública para interrumpir y controlar la transmisión se basaron en modelos de predicción y en la comprensión del comportamiento de la enfermedad.

Esta enfermedad sugiere desafíos en el uso de modelos matemáticos para describir y predecir la dinámica de la pandemia. Se han propuesto una gran cantidad de modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales ordinarias y/o parciales diseñados específicamente para

examinar la propagación de COVID-19, los cuales han abordado puntos importantes relacionados con la estimación de los parámetros (Calvetti *et al.*, 2020); por ejemplo, Tejeira-Huacani (2020) realiza un análisis de la propagación de la pandemia usando una modificación del modelo Susceptible-Infectado-Recuperado (SIR), donde se estudia la estabilidad lineal, se muestra que los estados asociados a los puntos fijos llegan a ser inestables y la dinámica del sistema considera medidas de contención. Concluye que estas son útiles para disminuir el número de personas infectadas.

Beira y Sebastião (2021) realizan un análisis de ajuste de un modelo compartimental para el caso portugués, utilizando una plataforma en línea de acceso abierto con la capacidad integrada de resolver sistemas de ecuaciones diferenciales. La cual permitió la validación basada en datos del modelo utilizado y fue la base para proyecciones robustas de diferentes escenarios futuros. Koufi y Koufi (2021), presentan un modelo estocástico de la epidemia de COVID-19 para una población con cinco compartimentos, dan un análisis numérico del modelo estocástico propuesto y realizan una comparación con los resultados del modelo determinista correspondiente. Baleanu, Mohammadi y Rezapour (Baleanu *et al.*, 2020), presentan un modelo de orden fraccionario con derivada Caputo-Fabrizio para modelar la transmisión de COVID-19, quienes implementaron el método homotópico de transformación, que

combina el método de análisis de homotopía y la transformada de Laplace, resolvieron el problema y dan una solución aproximada en series convergentes. Además, exponen resultados numéricos para simular la transmisión del virus y comparar los resultados usando la derivada de Caputo. Manevski *et al.* (2020) proponen un modelo semi paramétrico para describir y pronosticar la pandemia de COVID-19, usando inferencia bayesiana estimaron el número de reproducción efectivo, la tasa de fatalidad y la proporción de la población infectada en el país de Eslovenia; sin embargo, estos autores no consideran el modelamiento conjunto de los rebrotes a través del tiempo.

Por lo tanto, no es una tarea sencilla describir mediante un modelo genérico, el comportamiento de los incrementos de contagio de esta pandemia desde sus inicios. Las mezclas de distribuciones estadísticas representan una herramienta adecuada para analizar el comportamiento de N subpandemias con distintos comportamientos como un todo. Un modelo de mezclas de funciones de distribución permite determinar la presencia de subpoblaciones dentro de una población general, esto sin requerir observaciones individuales de cada una de ellas (Ghojogh *et al.*, 2019).

A la fecha no se han encontrado evidencias literarias de estudios realizados en el estado de Guerrero que utilicen un modelo matemático donde se incluyan varias etapas de transición de esta pandemia. Por esta razón, este trabajo tiene como objetivo, modelar matemáticamente el comportamiento de los rebrotes de infecciones diarias, de hospitalizados y de muerte por COVID-19, a través de un modelo de mezcla de distribuciones gaussianas, desde sus inicios hasta febrero de 2022 para el estado de Guerrero, estos modelos son analizados desde el punto de vista de la Estadística Bayesiana, la cual nos permite actualizar el conocimiento previo sobre las cantidades de interés, utilizando los datos observados y calcular las distribuciones posteriores marginales de dichas variables, que se obtienen numéricamente usando la metodología de Cadena de Markov vía Monte Carlo (Robert y Casella 2005).

Materiales y Métodos

Modelo de Mezclas

En la mayoría de los estudios estadísticos se supone que se tiene una muestra de observaciones que provienen de la misma distribución, por esta razón el interés con los datos muestrales consiste en buscar una sola distribución que describa el comportamiento de los datos. Sin embargo, es posible que se tengan datos que provienen de más de una distribución, por lo que se deben considerar otros modelos que describan mejor ese tipo de datos.

A toda variable aleatoria se le considera que proviene de una distribución de probabilidad, ya sea una distribución conocida o no. Algunas variables aleatorias se extraen de una única distribución, como la Normal. Sin embargo, existen otras variables aleatorias que pueden haberse generado a partir de una mezcla de varias distribuciones y no de una sola. En el contexto estadístico, se utiliza un modelo de mezclas de distribuciones como un modelo probabilístico para representar la presencia de subpoblaciones dentro de una misma población. Los modelos de mezclas finitas proporcionan una metodología que puede identificar la heterogeneidad no observada en los datos, que se debe a la influencia de diferentes variables o grupos que pueden causar sobre dispersión o heteroscedasticidad en un modelo tradicional. En general, un modelo de mezcla finita proporciona una alternativa paramétrica que describe la distribución desconocida en términos de mezclas de distribuciones conocidas, que hace a los modelos ser más flexibles.

La distribución de la mezcla es una suma ponderada de K distribuciones de probabilidad $g_1(x; \theta_1), g_2(x; \theta_2), \dots, g_K(x; \theta_K)$, con pesos $\pi_1, \dots, \pi_K$ que suman uno, y cada distribución de la mezcla tiene su propio parámetro θ_i . La distribución de la mezcla se presenta como:

$$p(\theta) = \sum_{i=1}^K \pi_i g_i(x; \theta_i),$$

con $\sum_{i=1}^K \pi_i = 1$, $\pi_i > 0$, donde:

X – es la muestra poblacional de tamaño K ,
 $g_i(x|\theta_i)$ - densidad de la distribución i ,
 θ_i - vector de parámetros de la distribución i ,
 π_i - peso de la mezcla de la distribución i .

El conjunto de parámetros que definen a estos modelos puede ser estimado mediante diferentes técnicas como métodos gráficos, método de Esperanza-Maximización (EM), método de momentos, método de máxima verosimilitud, aproximaciones Bayesianas, entre otras.

Modelo de ajuste de curvas

Sea X una variable aleatoria con función de densidad de probabilidad (fdp) Normal con media μ y varianza σ^2 , la cual denotamos por $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, dicha fdp está dada por:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad -\infty < \mu < \infty, \sigma^2 > 0,$$

donde $x \in \mathbb{R}$. La función de distribución acumulada (fda) de X , está dada por:

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_X(u) du$$

La fdp es también conocida como distribución gaussiana, cuya representación gráfica de la densidad y de la distribución acumulada se muestra en la Figura 1. La distribución normal es muy utilizada en modelos de regresión lineal y de análisis de varianza (ANOVA), los cuales son aplicados en distintas áreas de la ciencia, como la Biología, Medicina, Química, Agronomía, etc. Algunas de sus propiedades más importantes es que el valor esperado de X , es $E(X) = \mu$, el cual representa el valor mas probable de la variable X , y la varianza es $Var(X) = \sigma^2$, el cual representa la anchura de la curva gaussiana.

Los modelos de ajuste de curvas son modelos matemáticos útiles para predecir la trayectoria de pandemias a lo largo del tiempo t . Una curva comúnmente utilizada para tales modelos es una curva en forma de campana definida por la función gaussiana:

$$f(t) = P \exp\left(-\frac{(t - t_m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

donde t_m es el tiempo donde la curva alcanza el pico máximo, P es la magnitud del pico, y σ

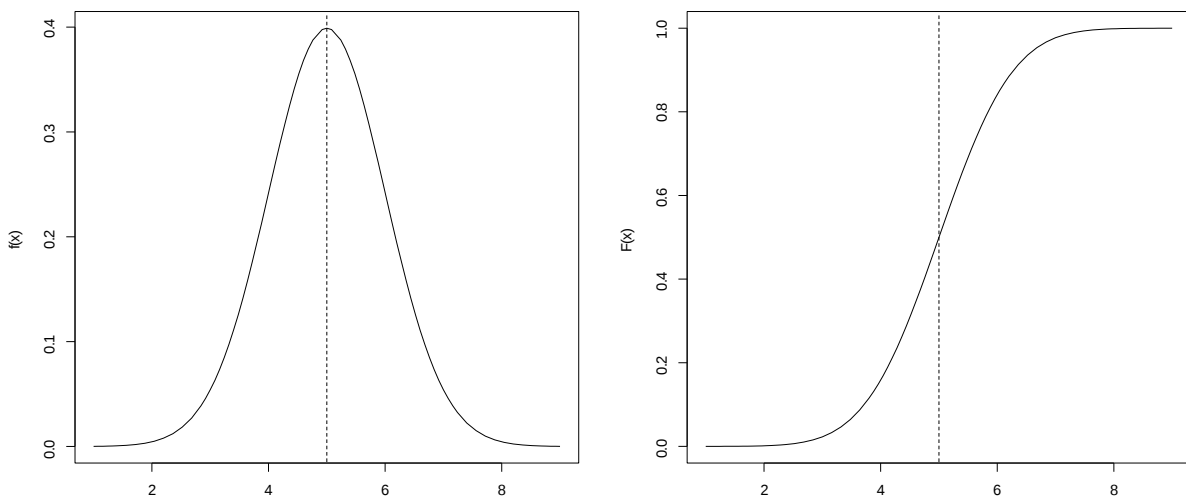


Figura 1. Función de densidad de probabilidad (izquierda) y Función de distribución acumulada (derecha) de $N(5,1)$.

refleja la anchura de la curva. Alternativamente, $f(t)$ en (1) puede expresarse como:

$$f(t) = (P\sqrt{2\pi\sigma}) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(t - t_m)^2}{2\sigma^2}\right) \\ = M\phi(t, t_m, \sigma)$$

donde $M = P\sqrt{2\pi\sigma}$ representa el número total de infectados y $\phi(t, t_m, \sigma)$ es la función de densidad de probabilidad Normal con media t_m y desviación estándar σ , la cual rige cómo se distribuye M a lo largo del tiempo; es decir, el número de casos esperado en el momento t está dado por $M\phi(t, t_m, \sigma)$ (Kaciroti *et al.*, 2021).

Metodología

Para que un modelo de ajuste de curvas funcione bien, la forma de la curva elegida es importante, debe tener un buen ajuste con los datos observados y una justificación teórica subyacente adecuada. La curva definida por una función Gaussiana tiene una forma simétrica alrededor del pico, y las tendencias futuras se pronostican extrapolando la tendencia observada, forzando el componente posterior al pico de la trayectoria para que sea simétrico con la parte anterior al pico (Kaciroti *et al.*, 2021). Estas previsiones suponen que los factores relacionados con la pandemia no cambian con el tiempo, por lo que son adecuadas cuando la propagación de la pandemia es relativamente homogénea y no hay medidas atenuantes de cambios de comportamiento en cada curva o en cada rebrote.

Aunque la suposición de homogeneidad a lo largo del tiempo puede ser razonable en periodos de tiempo cortos, no es realista para periodos de tiempo largos y áreas grandes, ya que los cambios en la progresión de la pandemia darán lugar a cambios de comportamiento a nivel individual, y a cambios en las políticas y prácticas a nivel local, estatal y federal (por ejemplo, distanciamiento social y órdenes de permanecer en casa). Estos cambios pueden alterar, a veces de forma sustancial, el curso natural de la enfermedad.

Para tener en cuenta estos cambios, proponemos un modelo en el que la curva de la trayectoria de los infectados diarios (hospitalizados o defunciones) $\mu(t)$ en el día t se exprese como

una mezcla de múltiples subcurvas homogéneas. Se puede considerar que cada subcurva capta implícitamente una subepidemia (rebrote) o una tendencia específica en la trayectoria durante un periodo de tiempo determinado, que se relaciona con factores subyacentes (conocidos o desconocidos). Esto es particularmente relevante para la pandemia de COVID-19 en el estado de Guerrero, en donde los cambios en el cumplimiento del distanciamiento social dieron lugar a varios aumentos de casos en el periodo aquí analizado. Específicamente, se tiene que los infectados diarios (hospitalizados o defunciones) en el día t está comprendido por:

$$y(t) = \sum_{i=1}^K y_i(t)$$

donde $y_i(t)$ representa el número de infectados (hospitalizados o defunciones) en el día t atribuidas al rebrote $i = 1, \dots, K$, $K \geq 1$ es el número de rebrotes identificados empíricamente. La trayectoria $\mu_i(t) = E(y_i(t))$, para el rebrote i puede modelarse mediante una función Gaussiana homogénea $\mu_i(t) = C_i\phi(t; t_{m,i}, \sigma_i)$, donde C_i es el número de casos infectados (hospitalizados o defunciones) globales, $t_{m,i}$ es el tiempo donde se alcanza el pico y σ_i representa la amplitud del rebrote i . La curva de infectados (hospitalizados o defunciones) para toda la pandemia es $E(y(t)) = \mu(t)$, la cual se puede descomponer como:

$$\mu(t) = \sum_{i=1}^K \mu_i(t) = \sum_{i=1}^K C_i \phi(t; t_{m,i}, \sigma_i)$$

Sea $C = \sum_{i=1}^K C_i$ los infectados (hospitalizados o defunciones) globales de la pandemia, entonces $\pi_i = C_i/C$ es la proporción de todos los infectados (hospitalizados o defunciones) atribuidas a la curva i , con $C_i = C\pi_i$. Por lo tanto, proponemos el siguiente modelo de mezcla basado en curvas gaussianas para modelar la trayectoria de los casos diarios (hospitalizados diarios y defunciones diarias), de COVID-19 para el estado de Guerrero, definido por:

$$\mu(t) = C \sum_{i=1}^K \pi_i \phi(t; t_{m,i}, \sigma_i)$$

donde C son los casos de infectados (hospitalizados o defunciones) globales de toda la pandemia y $\phi(t; t_{m,i}, \sigma_i)$ representa la parte de la curva relacionada con algún(os) factor(es) subyacente(s), π_i es la proporción de infectados (hospitalizados o defunciones) totales que se atribuyen a dicho(s) factor(es) indexado(s) por i , y K es el número de subcurvas que componen la mezcla. El número de parámetros que identifican la curva es:

$$3K: C, \pi_1, \dots, \pi_{K-1}, (t_{m,1}, \sigma_1), \dots, (t_{m,K}, \sigma_K)$$

La $\phi(t; t_{m,i}, \sigma_i)$ es la función de densidad de probabilidad Gaussiana, definida por el parámetro de localización $t_{m,i}$, que representa el tiempo desde el primer infectado hasta la cúspide, y el parámetro de escala σ_i , que representa la dispersión de la curva.

En este trabajo, se usa el enfoque Bayesiano (Gelman et al., 2004) para estimar los parámetros de interés, entre ellos, los parámetros de la curva y sus intervalos de credibilidad. Suponemos que la distribución de los datos de infectados (hospitalizados o defunciones) observados $y(t)$ en el momento t es una Binomial Negativa (BN); es decir,

$$Y(t) \sim BN(N, p_t)$$

donde N es el tamaño de la población del estado. Se utiliza una función de distribución Binomial Negativa para $Y(t)$, ya que es apropiada para datos de conteo, con $E(Y(t)) = \mu(t) N p_t / (1 - p_t)$. Los métodos de Cadenas de Markov vía Monte Carlo Bayesianos (Green 1995; Koufi y Koufi, 2021) se utilizan para realizar extracciones de la distribución posterior marginal de los parámetros desconocidos.

Distribuciones a priori

Se utilizaron distribuciones previas débilmente informativas para todos los parámetros del

modelo. Las distribuciones a priori para nuestro estudio en general tienen la siguiente forma:

$$\begin{aligned} t_{m_1} &\sim N(\mu_1, \sigma^2) \\ t_{m_2} &\sim N_T(t_{m_1}, \mu_2, \sigma^2) \\ t_{m_3} &\sim N_T(t_{m_2}, \mu_3, \sigma^2) \\ &\vdots \\ t_{m_K} &\sim N_T(t_{m_{K-1}}, \mu_K, \sigma^2) \end{aligned}$$

Note que se tiene la restricción $t_{m_1} < t_{m_2} < t_{m_3} < \dots < t_{m_K}$, donde $N_T(t_l, \mu_K, \sigma^2)$ es una función de densidad de probabilidad Normal Truncada por la izquierda definida por:

$$f_T(t) = \frac{1}{\sigma} \frac{\phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{t_l-\mu}{\sigma}\right)}, \quad t_l < t < \infty$$

donde $\phi(\cdot)$ y $\Phi(\cdot)$ son las funciones de densidad y de distribución acumulada de probabilidad de la normal estándar. Para los parámetros σ_i y π las distribuciones a priori se muestran de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \sigma_i &\sim \Gamma(\alpha, \lambda), \quad i = 1, \dots, K, \\ \pi &\sim \text{Dirichlet}(\alpha_1, \dots, \alpha_K) \end{aligned}$$

Distribución a posteriori

El cálculo de las densidades a posteriori suele verse facilitado por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} p(X) &\propto p(\theta) p(\theta) \\ &\propto \prod_{i=1}^n [G p_X(\theta_1, \dots, \theta_n)] \times p(\theta_1) p(\theta_2) \dots p(\theta_n) \end{aligned}$$

La información proporcionada por los datos $p(\theta)$ es llamada función de verosimilitud, $p(X)$ es la distribución a posteriori y $p(\theta)$ es la distribución a priori.

Resultados

En la Figura 2, se muestra el comportamiento a través del tiempo de los casos infectados diarios por COVID-19 en el estado de Guerrero a partir del 15 de marzo de 2020 al 27 de febrero de 2022,

en la figura se puede apreciar cinco rebrotes, el primero a principios de julio de 2020, el segundo a finales de septiembre del mismo año, el tercero a mediados del mes de enero de 2021, el cuarto a principios de agosto de 2021 y finalmente el quinto a mediados de enero de 2022.

En la Figura 3, se muestran los casos de hospitalizaciones diarias a partir del 08 de marzo de 2020 al 30 de diciembre de 2021, en la figura se puede apreciar cuatro rebrotes, en los meses de junio y octubre de 2020, y en febrero y agosto de 2021.

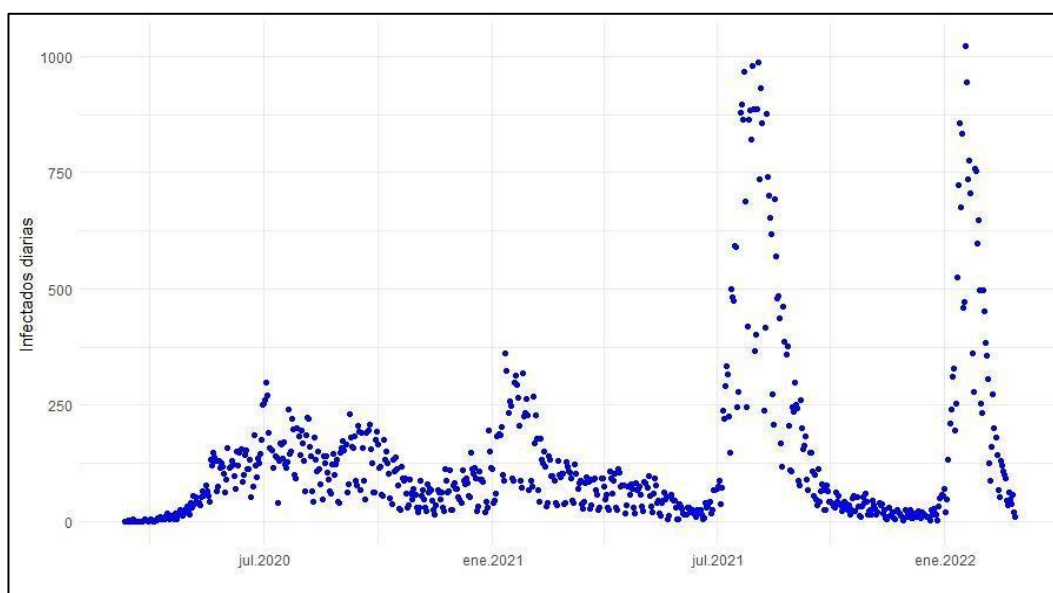


Figura 2. Casos de infectados diarios por COVID-19 en el estado de Guerrero.

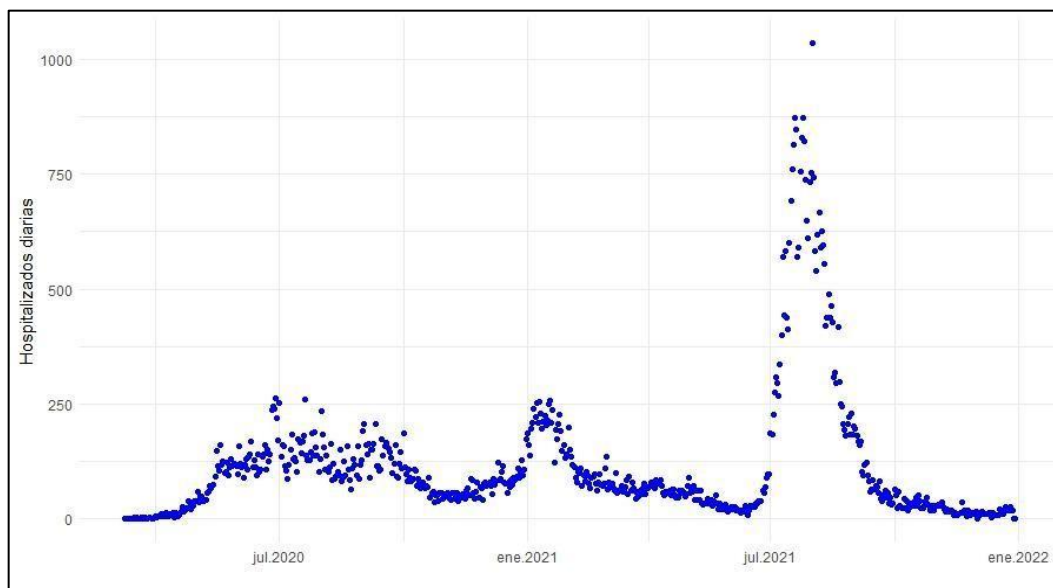


Figura 3. Casos de hospitalizados diarios por COVID-19 en el estado de Guerrero.

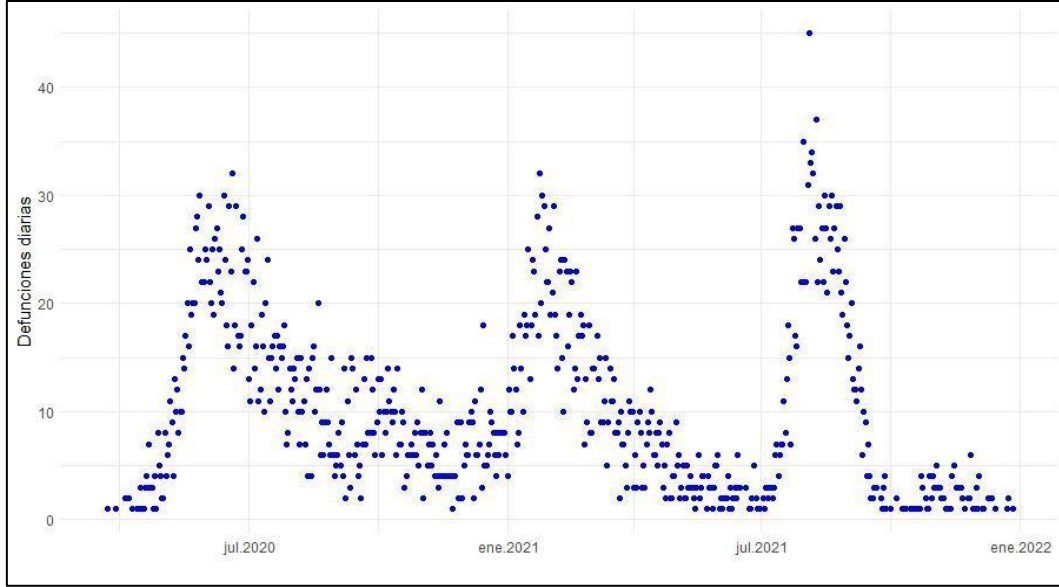


Figura 4. Casos de defunciones diarias por COVID-19 en el estado de Guerrero.

Respecto al caso de defunciones diarias, como se muestra en la Figura 4, se observan defunciones diarias a partir del 22 de marzo de 2020 al 27 de diciembre de 2021, en la figura se puede apreciar cuatro rebrotes en los meses junio y octubre de 2020 y en febrero y agosto de 2021.

En cada uno de los casos anteriores, se identificaron rebrotes de forma empírica y se propusieron los siguientes modelos:

Infectados:

$$Y(t) \sim BN(M, p_t)$$

$$p_t = \frac{M}{\mu(t) + M}$$

$$\begin{aligned} \mu(t) &= M \sum_{i=1}^5 \pi_i \phi(t; t_{m,i}, \sigma_i) \\ &= M [\pi_1 \phi(t; t_{m,1}, \sigma_1) \\ &\quad + \pi_2 \phi(t; t_{m,2}, \sigma_2) \\ &\quad + \pi_3 \phi(t; t_{m,3}, \sigma_3) \\ &\quad + \pi_4 \phi(t; t_{m,4}, \sigma_4) \\ &\quad + \pi_5 \phi(t; t_{m,5}, \sigma_5)] \end{aligned}$$

Se propusieron las siguientes distribuciones a priori para los parámetros:

$$\begin{aligned} t_{m_1} &\sim N(130, \frac{1}{100}) \\ t_{m_2} &\sim N_T(t_{m_1}, 210, \frac{1}{100}) \\ t_{m_3} &\sim N_T(t_{m_2}, 325, \frac{1}{100}) \\ t_{m_4} &\sim N_T(t_{m_3}, 530, \frac{1}{100}) \\ t_{m_5} &\sim N_T(t_{m_4}, 690, \frac{1}{100}) \\ \sigma_i &\sim \Gamma(0.1, 0.1), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \\ \pi_i &\sim \text{Dir}(1), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \end{aligned}$$

Hospitalizados:

$$Y(t) \sim BN(M, p_t)$$

$$p_t = \frac{M}{\mu(t) + M}$$

$$\begin{aligned}
\mu(t) &= M \sum_{i=1}^4 \pi_i \phi(t; t_{m,i}, \sigma_i) \\
&= M[\pi_1 \phi(t; t_{m,1}, \sigma_1) \\
&\quad + \pi_2 \phi(t; t_{m,2}, \sigma_2) \\
&\quad + \pi_3 \phi(t; t_{m,3}, \sigma_3) \\
&\quad + \pi_4 \phi(t; t_{m,4}, \sigma_4)]
\end{aligned}$$

Se propusieron las siguientes distribuciones a priori para los parámetros:

$$\begin{aligned}
t_{m_1} &\sim N(100, \frac{1}{100}) \\
t_{m_2} &\sim N_T(t_{m_1}, 170, \frac{1}{100}) \\
t_{m_3} &\sim N_T(t_{m_2}, 295, \frac{1}{100}) \\
t_{m_4} &\sim N_T(t_{m_3}, 510, \frac{1}{100}) \\
\sigma_i &\sim \Gamma(0.1, 0.1), \quad i = 1, 2, 3, 4 \\
\pi_i &\sim \text{Dir}(1), \quad i = 1, 2, 3, 4
\end{aligned}$$

Defunciones:

$$\begin{aligned}
Y(t) &\sim BN(M, p_t) \\
p_t &= \frac{M}{\mu(t) + M} \\
\mu(t) &= M \sum_{i=1}^4 \pi_i \phi(t; t_{m,i}, \sigma_i) \\
&= M[\pi_1 \phi(t; t_{m,1}, \sigma_1) \\
&\quad + \pi_2 \phi(t; t_{m,2}, \sigma_2) \\
&\quad + \pi_3 \phi(t; t_{m,3}, \sigma_3) \\
&\quad + \pi_4 \phi(t; t_{m,4}, \sigma_4)]
\end{aligned}$$

Se propusieron las siguientes distribuciones a priori para los parámetros:

$$\begin{aligned}
t_{m_1} &\sim N(50, \frac{1}{100}) \\
t_{m_2} &\sim N_T(t_{m_1}, 180, \frac{1}{100}) \\
t_{m_3} &\sim N_T(t_{m_2}, 300, \frac{1}{100}) \\
t_{m_4} &\sim N_T(t_{m_3}, 470, \frac{1}{100})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_i &\sim \Gamma(0.1, 0.1), \quad i = 1, 2, 3, 4 \\
\pi_i &\sim \text{Dir}(1), \quad i = 1, 2, 3, 4
\end{aligned}$$

Mediante la elaboración de un programa en R ([R Core Team, 2021](#)) y uso del paquete JAGS ([Plummer, 2019](#)) se obtuvieron las distribuciones marginales posteriores de cada uno de los parámetros de interés mediante métodos de Cadenas de Markov Monte Carlo. Las estimaciones de los parámetros se obtuvieron como la media aritmética de las cadenas generadas de la distribución objetivo en cada uno de los parámetros. Para cada estimación de los

modelos propuestos, se generaron dos cadenas de tamaño 50,000 iteraciones, de las cuales se tomó un *burn-in* de 10,000 y un adelgazamiento de las cadenas de 40, obteniéndose 1,000 iteraciones por cada cadena. Finalmente, se generaron diagnósticos de convergencia de las cadenas correspondientes.

En las Figuras 5, 6 y 7 se presenta el ajuste del modelo de la mezcla de distribuciones gaussianas (en línea negra) sobre los datos observados (puntos azules) y su respectivo intervalo de credibilidad del 95% (en línea discontinua negra).

Para el caso de infecciones diarias se ajustó un modelo de mezclas con $K = 5$, y para el caso de defunciones y muertes diarias un modelo con $K = 4$. El primer pico representa la dinámica inicial de la pandemia, tras la introducción de medidas de control en marzo, y los otros picos capturan el aumento que ocurrió después de que las medidas fueran eliminadas en diversos grados. En la Tabla 1, se presentan las estimaciones Bayesianas de $t_{m,i}$, $i = 1, \dots, K$ para los tres casos estudiados en el estado de Guerrero; es decir, la fecha estimada del pico de cada rebrote.

La primera fecha de pico para infectados, hospitalizados y defunciones se localiza entre los meses de junio y julio de 2020. La segunda fecha de pico varía entre los meses de agosto de 2020 y octubre de 2020. La tercera fecha de pico se vio reflejada en el modelo en diciembre de 2020 para los casos hospitalizados y enero de 2021 para los casos de infectados y defunciones. Se identificó un cuarto rebrote para las tres bases de datos, con fecha de pico en julio de 2021 para las defunciones y en el mes de agosto del 2021 para

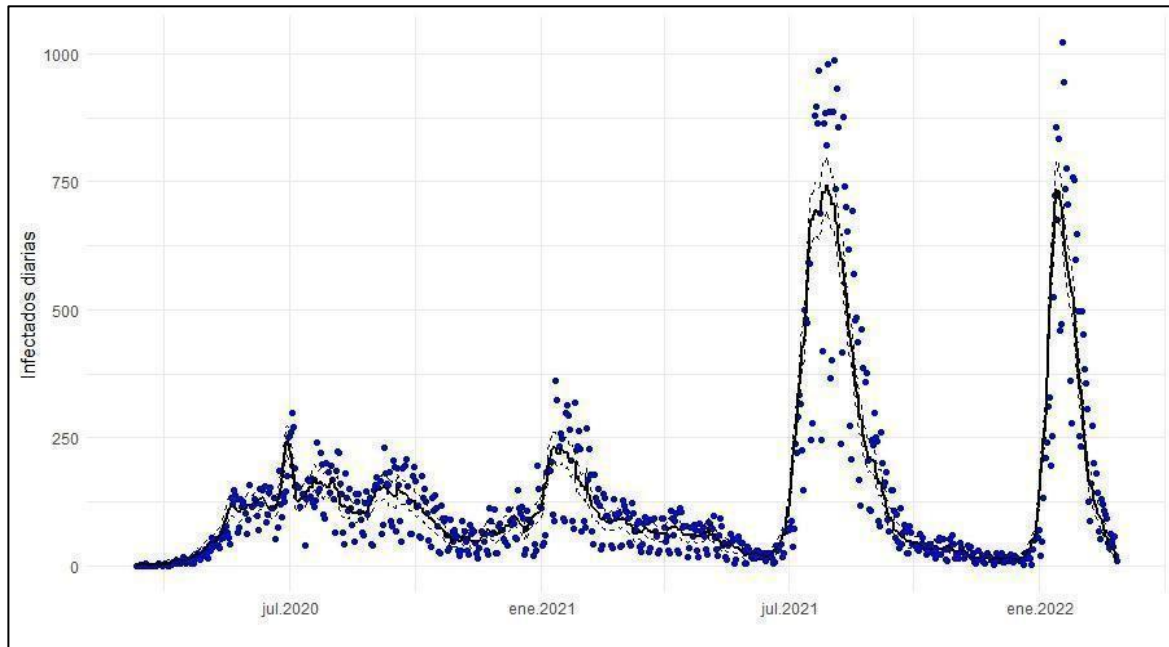


Figura 5. Ajuste del modelo de mezclas a los datos de casos de infectados diarios por COVID-19 en el estado de Guerrero.

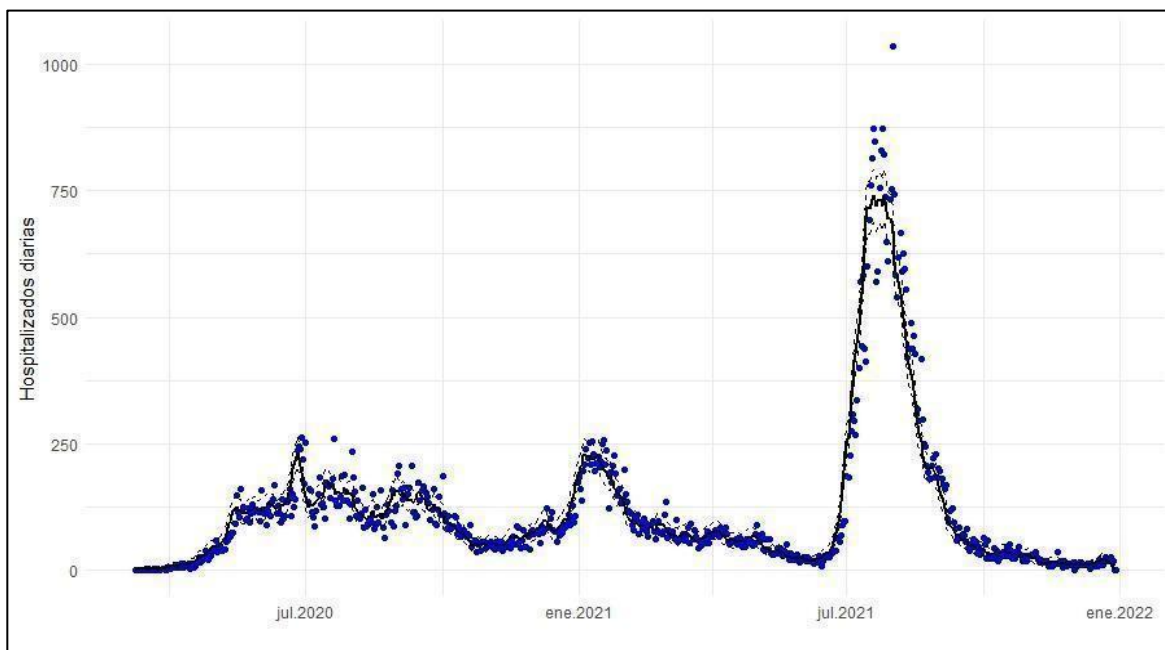


Figura 6. Ajuste del modelo de mezclas a los datos de casos hospitalizados por COVID-19 en el estado de Guerrero.

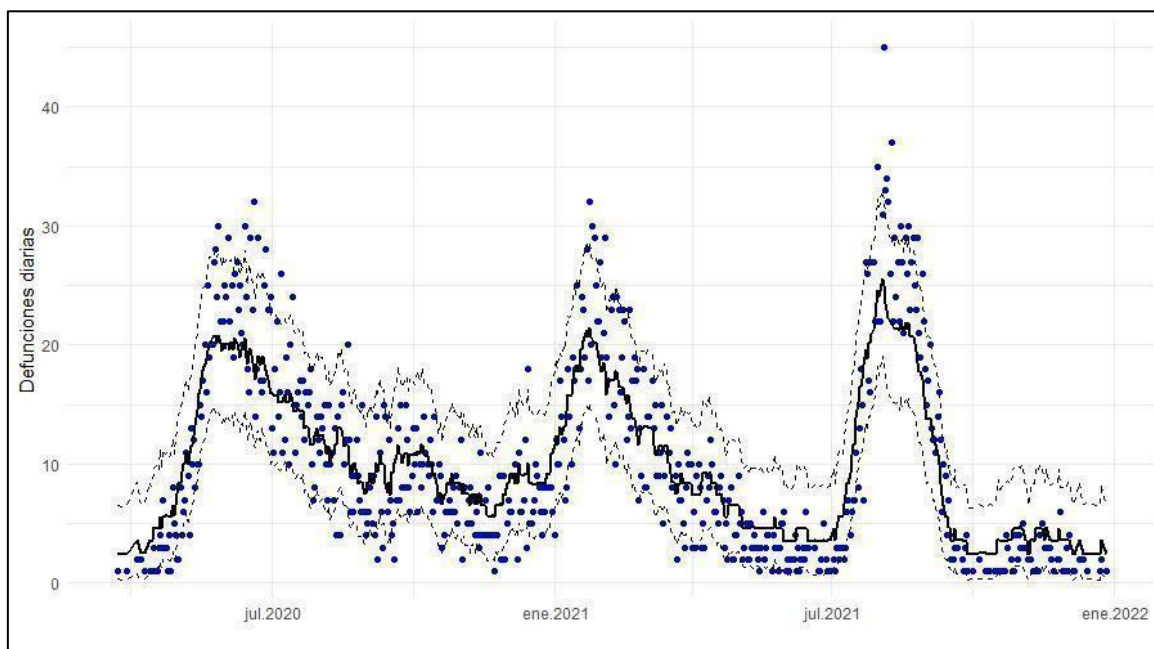


Figura 7. Ajuste del modelo de mezclas a los datos de casos de muertes por COVID-19 en el estado de Guerrero.

Tabla 1. Estimaciones del pico máximo de casos COVID-19 en Guerrero.

Casos	Rebote 1	Rebote 2	Rebote 3	Rebote 4	Rebote 5
Infectados	Julio 9, 2020	Sept 22, 2020	Ene 15, 2021	Agost 8, 2021	Ene 15, 2022
Hospitalizados	Jun 23, 2020	Agost 27, 2020	Dic 30, 2020	Agost 2, 2021	
Defunciones	Jun 6, 2020	Oct 3, 2020	Ene 31, 2021	Jul 30, 2021	

los casos diarios y para los hospitalizados. Por último, el modelo de mezcla logra captar un quinto rebrote para los datos de infectados localizando el máximo número de casos en el mes de enero de 2021.

Conclusiones

En este trabajo, se modeló matemáticamente el comportamiento de los rebrotes de infecciones

diarias, de hospitalizados y de muerte por COVID-19, a través de un modelo de mezcla de distribuciones gaussianas, desde los inicios de la pandemia hasta febrero de 2022 con datos reportados para el estado de Guerrero. Los modelos propuestos fueron analizados desde el punto de vista de la Estadística Bayesiana y medible el uso de software estadístico R y el paquete JAGS. Las estimaciones obtenidas fueron adecuadas, observando que los picos máximos se

obtuvieron durante o después de los periodos vacacionales de verano y diciembre.

Referencias

- Baleanu, D., Mohammadi, H., Rezapour, S. (2020). A fractional differential equation model for the COVID-19 transmission by using the Caputo–Fabrizio derivative. *Advances in Difference Equations*, 2020, 299.
<https://doi.org/10.1186/s13662-020-02762-2>
- Beira, M.J., Sebastião, P.J. (2021). A differential equations model-fitting analysis of COVID-19 epidemiological data to explain multi-wave dynamics. *Scientific Reports*, 11, 16312.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-95494-6>
- Calvetti1, D., Hoover, A., Rose, J., Somersalo, E. (2020). Bayesian dynamical estimation of the parameters of an SE(A)IR COVID-19 spread model.
[2005.04365] *Bayesian dynamical estimation of the parameters of an SE(A)IR COVID-19 spread model* (arxiv.org)
- Gelman, A., Chew, G.L., Shnaidman, M. (2004). Bayesian Analysis of Serial Dilution Assays. *Biometrics*, 60, 407-417.
<https://doi.org/10.1111/j.0006-341x.2004.00185.x>
- Green, P.H. (1995). Reversible jump Markov chain Monte Carlo computation and Bayesian model determination. *Biometrika*, 82, 711-732.
<https://doi.org/10.1093/biomet/82.4.711>
- Ghojogh, B., Ghojogh, A., Crowley, M., Karray, F. (2019). Fitting A Mixture Distribution to Data: Tutorial. *arXiv* (Cornell University).
<http://export.arxiv.org/pdf/1901.06708>
- Kaciroti, N.A., Lumeng, C., Parekh, V., Boulton, M.L. (2021). A Bayesian Mixture Model for Predicting the COVID-19 Related Mortality in the United States. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 104, 1484-1492.
<https://doi.org/10.4269/ajtmh.20-1147>
- Koufi, A.E., Koufi, N.E. (2021). Stochastic differential equation model of Covid-19: Case study of Pakistan. *Results in physics*, 34, 105218.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2022.105218>
- Manevski, D., Gorenjec, N.R., Kejžar, N., Blagus, R. (2020). Modeling COVID-19 pandemic using Bayesian analysis with application to Slovene data. *Mathematical biosciences*, 329, 108466.
<https://doi.org/10.1016/j.mbs.2020.108466>
- Robert, C.P., Casella, G. (2005). *Monte Carlo Statistical Methods* (Springer Texts in Statistics). Springer-Verlag New York, Inc. eBooks.
<https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1051451>
- R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
<https://www.R-project.org/>
- PAHO (2020). Epidemic diseases – Cumulative suspected and confirmed COVID-19 cases reported by countries and territories in the Americas. Pan American Health Organization. [covid19-cumulative cases-03.31.20.pdf](https://paho.org/covid19-cumulative-cases-03.31.20.pdf) (paho.org)
- Plummer, M. (2019). *rjags: Bayesian Graphical Models using MCMC*. R package version 4-10.
<https://CRAN.R-project.org/package=rjags>
- Tejeira-Huacani, J.D. (2020). Análisis de un modelo matemático simple para la descripción de propagación de COVID-19. *Revista Boliviana de Física*, 37, 41-43.
http://www.scielo.org.bo/pdf/rbf/v37n37/v37n37_a06.pdf

Doi.

Artículo de investigación

**Revisión de los métodos de remediación de suelos agrícolas y forestales
afectados por metales y metaloides tóxicos**

**Review of remediation methods for agricultural and forest soils affected by
toxic metals and metalloids**

**Revisão dos métodos de remediação de solos agrícolas e florestais afetados por
metais e metaloides tóxicos.**

Fredderick Arroyo-Díaz¹ ID. 0000-0002-3916-8738
Columba Rodríguez-Alviso^{1*} ID. 0000-0001-9600-8776
José Luis Rosas-Acevedo¹ ID. 0000-0003-2744-7454
Oscar Talavera-Mendoza² ID. 0000-0002-4297-2698
Elías Hernández-Castro³ ID. 0000-0001-6573-6236
Oscar Gabriel Villegas-Torres⁴ ID. 0000-0001-9885-3906

¹Doctorado en Ciencias Ambientales, Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, Universidad Autónoma de Guerrero, Privada de Laurel 13, Col. El Roble, 39640, Acapulco, Guerrero, México.

²Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, Ex-hacienda de San Juan Bautista, 40323, Taxco el Viejo, Guerrero, México.

³Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Autónoma de Guerrero, Carretera Iguala-Tuxpan, km 2.5, 40101, Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

⁴Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 62210, Avenida Universidad 1001, 62210, Cuernavaca, Morelos, México.

*Autor de correspondencia columbaalviso@uagro.mx

Enviado: 03/02/2024

Revisado: 06/03/2024

Aprobado: 08/05/2024

Publicado: 15/06/2024

Resumen

La contaminación de los suelos agrícolas y forestales se ha convertido en un problema mundial que ha llamado la atención de la población de manera considerable debido a la acumulación excesiva de contaminantes persistentes como metales y metaloides tóxicos. Esta investigación tiene como objetivo identificar cuáles son los métodos utilizados para la remediación de suelos afectados con metales y metaloides tóxicos a través de la revisión de literatura especializada. El estudio es cualitativo, basado en el análisis de contenido. Se revisaron 103 artículos publicados entre 1990 y 2023. Los resultados muestran que los métodos más utilizados para remover o inmovilizar los metales y metaloides tóxicos en suelos han

sido clasificados de acuerdo con el propósito, las medidas de mitigación, el control de fuentes y la contención de contaminantes. Aunque todos los métodos publicados tienen como objetivo evitar la degradación del ecosistema y el progreso de contaminantes a las cadenas tróficas, es importante separarlos de acuerdo con las técnicas que se utilizan, ya que pueden utilizar agentes físicos, sustancias químicas, microorganismos o plantas. Los métodos para la remediación de suelos afectados con metales y metaloides tóxicos revisados en este documento se clasifican de acuerdo a su naturaleza en tres grupos: métodos físicos, métodos químicos y métodos biológicos.

Palabras clave: Metales y metaloides tóxicos, Remediación, Métodos físicos, Métodos químicos, Métodos biológicos.

Abstract

Agricultural and forestry soils pollution have become a global problem that has attracted considerable public attention due to the excessive accumulation of persistent pollutants such as toxic metals and metalloids. This research aims to identify the methods used for the remediation of soils affected by toxic metals and metalloids by reviewing specialized literature. The study is qualitative, based on content analysis. One hundred and three articles published between 1990 and 2023 were reviewed. The results show that the most used methods to eliminate or immobilize toxic metals and metalloids in affected soils have been classified according to purpose, mitigation measures, source control and containment of contaminants. Although all published methods aim to prevent the degradation of ecosystems and the progression of contaminants to food chains, it is important to separate them according to the techniques used, since they may involve physical, chemical agents, microorganisms, or plants. The methods for the remediation of soils affected with toxic metals and metalloids reviewed in this document are classified according to their nature into three groups: physical methods, chemical methods, and biological methods.

Keywords: Metals and toxic metalloids, Remediation, Physical methods, Chemical methods, Biological methods.

Resumen

La contaminación de los suelos agrícolas y forestales se ha convertido en un problema mundial que ha llamado la atención de la población de manera considerable debido a la acumulación excesiva de contaminantes persistentes como metales y metaloides tóxicos. Esta investigación tiene como objetivo identificar cuáles son los métodos utilizados para la remediación de suelos afectados con metales y metaloides tóxicos a través de la revisión de literatura especializada. El estudio es cualitativo, basado en el análisis de contenido. Se revisaron 103 artículos publicados entre 1990 y 2023. Los resultados muestran que los métodos más utilizados para remover o inmovilizar los metales y metaloides tóxicos en suelos han sido clasificados de acuerdo con el propósito, las medidas de mitigación, el control de fuentes y la contención de contaminantes. Aunque todos los métodos publicados tienen como objetivo evitar la degradación del ecosistema y el progreso de contaminantes a las cadenas tróficas, es importante separarlos de acuerdo con las técnicas que se utilizan, ya que pueden utilizar agentes físicos, sustancias químicas, microorganismos o plantas. Los métodos para la remediación de suelos afectados con metales y metaloides tóxicos revisados en este documento se clasifican de acuerdo a su naturaleza en tres grupos: métodos físicos, métodos químicos y métodos biológicos.

Palabras clave: Metales y metaloides tóxicos, Remediación, Métodos físicos, Métodos químicos, Métodos biológicos.

Introducción

La contaminación de suelos urbanos, agrícolas y forestales por metales y metaloides tóxicos (MMT's) ha sido objeto de estudio en distintas regiones del mundo durante las últimas décadas (Khan, 2016). Se estima que actualmente existen más de 10 millones de sitios con suelos agrícolas y forestales contaminados con MMT's en el mundo (Wang *et al.*, 2022). Los MMT's pueden provenir de fuentes naturales y antropogénicas (Jaishankar *et al.*, 2014). Las fuentes naturales incluyen formaciones rocosas, yacimientos minerales y combustibles fósiles (Li *et al.*, 2019). Las fuentes antropogénicas incluyen las

emisiones industriales y vehiculares, baterías, lodos residuales de plantas tratadoras de aguas residuales, industrias del curtido, galvanoplastia, agroquímicos, exploraciones de petróleo y gas y la industria minera (Wei y Yang, 2010; Islam *et al.*, 2019). Los MMT's no sufren degradación química o biológica, su concentración total en los suelos persiste desde miles hasta millones de años son y altamente tóxicos para la biota y ser humano (Adriano, 2001; Kirpichtchikova *et al.*, 2006; Rai *et al.*, 2018). Los suelos contienen de manera natural concentraciones de MMT's provenientes de la roca madre, pero una vez que la concentración de estos elementos supera la línea

geoquímica de base, la calidad del suelo se ve afectada significativamente por la acumulación excesiva de estos contaminantes. Esta acumulación excesiva de MMT's puede tener efectos adversos sobre la calidad, el rendimiento agrícola y forestal, en la composición nutricional y la actividad microbiana (Yao *et al.*, 2003). Por lo general, cuando los suelos están afectados con MMT's, sus propiedades físicas, químicas y biológicas se modifican. La degradación física del suelo puede identificarse a través de algunas propiedades como el incremento de la densidad aparente, la disminución de la porosidad del suelo y la disminución en la capacidad de retención de agua (Ramamoorthy, 2015). Las propiedades químicas del suelo incluyen el decremento de materia orgánica, baja fertilidad, desequilibrio en la concentración de micronutrientes, disminución de la disponibilidad de nitrógeno y fósforo, el incremento de la conductividad eléctrica y valores de pH muy bajos (Ussiri y Lal, 2005). Las propiedades biológicas afectadas de los suelos incluyen la mala absorción de carbono orgánico del suelo por las plantas y deficiencia en las condiciones para la promoción de comunidades bacterianas que favorecen el crecimiento y desarrollo vegetal (Leita *et al.*, 1995).

En suelos forestales y agrícolas, los MMT's interactúan con compuestos orgánicos e inorgánicos, lo cual, diversifica sus formas químicas y puede aumentar su biodisponibilidad (Maslin y Maier, 2000). Lo anterior provoca una disminución de la flora nativa y baja producción de cultivos de consumo humano (Carrillo y González, 2006). Algunas plantas que crecen en suelos afectados por MMT's pueden absorber estos elementos por la raíz y colocarlos en sus partes aéreas (tallos, hojas, flores y frutos), lo que permite el ingreso de estos elementos en la cadena alimentaria, ya sea por la vía planta-humano o planta-animal-humano (Peralta Videa *et al.*, 2009; Ling *et al.*, 2007).

En las últimas décadas, la remediación de suelos agrícolas y forestales contaminados con MMT's se han convertido en una prioridad para la comunidad científica mundial, debido a que la agricultura es una de las actividades antropogénicas importantes que provee de alimentos (verduras, frutas y granos) a la población mundial

(Lwin, 2018). En el mundo se han desarrollado diferentes métodos para remediar o mitigar los efectos de los MMT's en suelos utilizados con fines agrícolas y forestales. En esta revisión se describen los métodos más eficientes utilizados para remediar suelos contaminados con MMT's, clasificándolos en métodos físicos, químicos y biológicos.

Métodos para la remediación de suelos

Los métodos de remediación de suelos afectados con MMT's tienen como objetivo remover o inmovilizar estos elementos para mantener la salud del suelo y de los ecosistemas sanos (Wuana y Okieimen, 2011). Para seleccionar un método de remediación es importante realizar estudios previos sobre la caracterización fisicoquímica del suelo (Derakhshan *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019).

Algunos autores han clasificado los métodos de remediación de suelos de acuerdo con el propósito, debido a que se enfocan en aislar, inmovilizar, reducir la toxicidad, la separación física y la extracción de MMT's (Wuana y Okieimen, 2011). Otros autores clasifican los métodos de remediación de acuerdo con las medidas de mitigación en dos tipos; los llamados "suave *in situ*", cuyo objetivo es restaurar la fertilidad del suelo agrícola o forestal, y las "medidas destructivas *in situ* o *ex situ*", cuyo fin es evitar el contacto de MMT's con las plantas, los animales y el ser humano (Gupta *et al.*, 2020). Por otra parte, otras clasificaciones solo separan los métodos de remediación en dos grupos; el primer grupo es el control de fuentes, el cual involucra métodos de tratamiento *in situ* y *ex situ* para fuentes puntuales emisoras de MMT's; el segundo grupo incluye los remedios de contención que incluyen la construcción de barreras y estructuras de recubrimiento para evitar la migración de contaminantes (USEPA, 2007). En este documento se agrupan los métodos de contaminación de acuerdo con su naturaleza física, química y biológica.

Diseño y metodología de la investigación

Se siguió un diseño metodológico cualitativo basado en análisis de contenido de revistas

especializadas sobre los métodos utilizados en la remediación de suelos afectados con MMT's con énfasis en tres aspectos: frecuencia de palabras clave en los resúmenes, fuentes de contaminación de MMT's y métodos de remediación de suelos con MMT's. El proceso se dividió en dos fases: (1) recolección y organización de datos; y, (2) codificación y categorización.

Resultados

El proceso de búsqueda arrojó 103 artículos que cumplieron con lo establecido en el diseño y metodología de la investigación (Apéndice). Se encontraron 30 artículos sobre contaminación de suelos por MMT's, y la clasificación de los métodos de remediación de acuerdo a los propósitos de aislamiento, inmovilización, reducción de toxicidad, separación, extracción, medidas de mitigación, control de fuentes y remedios de contención. De los 73 artículos restantes, 17 abordan métodos físicos, 29 métodos químicos y 33 métodos biológicos (Figura 1). Con respecto al índice de calidad relativo *Scimago*, de los 103 artículos consultados, 50% son Q1, 21 % son Q2, 6% son Q3, y, 5% son Q4. El restante 18% no tiene cuartil de calidad (Figura 2). A continuación, se describen los métodos físicos, químicos y biológicos encontrados.

Métodos físicos

Los métodos físicos incluyen el reemplazo del suelo, aislamiento y contención de contaminantes, desorción térmica, electrocinética y solidificación (Jankaite y Vasarevicius, 2005; Yao *et al.*, 2012).

El método de reemplazo del suelo puede aislar de manera efectiva el suelo, disminuyendo así el efecto de los MMT's en el medio ambiente. Este método puede ser de tres tipos: 1) de reemplazo total o parcial del suelo afectado con un suelo libre de contaminantes (Qian y Liu, 2000; Zhang *et al.*, 2001); 2) excavación del suelo, el cual consiste en cavar profundamente el suelo contaminado con MMT's, induciendo la propagación del contaminante en los sitios profundos para lograr la dilución y la degradación natural (Derakhshan *et al.*, 2018); y, 3) importación de suelo nuevo, el cual consiste en

agregar una gran cantidad de suelo limpio al suelo contaminado para cubrir la superficie (o mezclándolo) y reducir los niveles de contaminantes (Zhou *et al.*, 2004).

El método de aislamiento y contención de contaminantes tiene como finalidad cubrir en su totalidad las fuentes emisoras para evitar que los MMT's se movilicen hacia los recursos naturales del entorno. Esto puede ser mediante la instalación de barreras impermeables como acero, cemento, bentonita o lechada (mezcla de cemento, agua y un aditivo acrílico). Las barreras cumplen el propósito de evitar la interacción de los sitios contaminados con el viento y el agua para evitar una mayor migración y dispersión de MMT's del sitio afectado (Jankaite y Vasarevicius, 2005). Las barreras construidas en posición vertical sobre los suelos afectados tienen la función de minimizar el movimiento de agua subterránea para evitar la movilización de MMT's (Mulligan, 2001). Estas barreras pueden estar rellenas de materiales como lechada, bentonita o cemento, cuyas estructuras pueden ser implementadas en paredes en zanjas excavadas, cortinas y perforaciones del suelo. Por otra parte, las barreras horizontales instaladas dentro del suelo (zanjas o pozos) no han demostrado ser efectivas, pero son potencialmente útiles para restringir el movimiento hacia abajo de los contaminantes metálicos al actuar como revestimientos subyacentes sin los requisitos de excavación (Mulligan, 2001; Jankaite y Vasarevicius, 2005). El método de tratamiento de desorción térmica se basa en la volatilidad del contaminante, removiéndolo del suelo mediante el calentamiento del subsuelo. Los métodos térmicos incluyen principalmente calentamiento conductivo, calentamiento resistivo eléctrico, calentamiento a base de vapor, calentamiento por radiación infrarroja y calentamiento por radiofrecuencia (Song *et al.*, 2017). Se ha demostrado que los métodos térmicos eliminan eficazmente MMT's como el Hg y el As. Sin embargo, puede afectar en gran medida las propiedades mineralógicas y fisicoquímicas del suelo (Roh *et al.*, 2000; Chang y Yen, 2006; Li *et al.*, 2010).

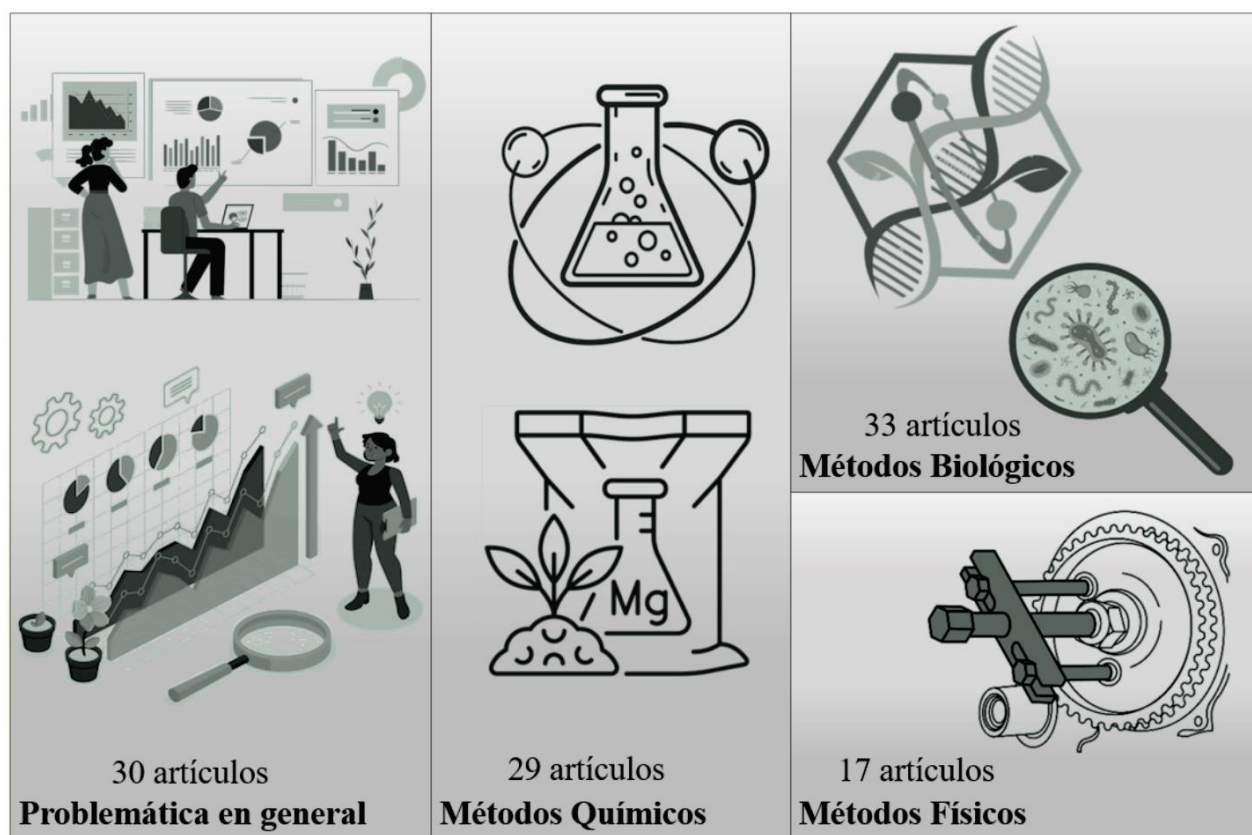


Figura 1. Cantidad de artículos consultados en la problemática general y métodos consultados en la remediación física, química y biológica de suelos.

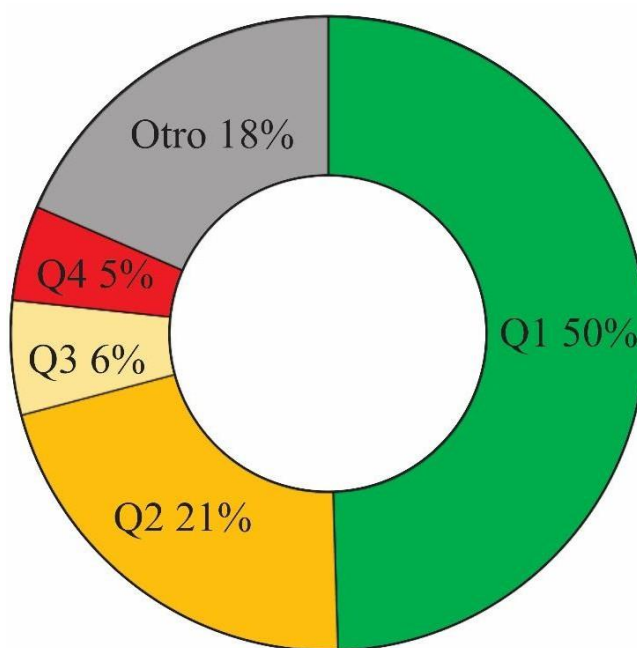


Figura 2. Clasificación y porcentaje de artículos consultados de acuerdo al índice de calidad *Scimago*.

De acuerdo con [Huang et al. \(2011\)](#), la remediación térmica puede provocar la generación de complejos químicos y órgano-metálicos que resultan difíciles de extraer.

El método de remediación electrocinética sirve para eliminar los MMT's de la matriz del suelo por medio de una corriente eléctrica. Esta técnica incluye mecanismos como electromigración, electroósmosis, electroforesis y electrólisis ([Jankaite y Vasarevicius, 2005](#)). Este método ha mostrado buenos resultados. Sin embargo, el aplicar agentes quelantes como ácido etilendiaminodisuccínico, ácido nitrilotriacético y ácido cítrico, mejora la eficiencia de la técnica en la remoción de MMT's como As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn. Además, algunos investigadores han combinado los métodos de lavado y la electrocinética para complementar la tecnología de lavado en suelos como lo demostró [Kim et al. \(2008\)](#) en la eliminación de Co^{+2} y Cs^+ , [Ng et al. \(2014\)](#) en la remoción de Pb, [Kim et al. \(2015\)](#) en suelo contaminado con U y [Li et al. \(2016\)](#) en el tratamiento de suelos contaminados con Cr. La solidificación consiste en la encapsulación física de MMT's en una matriz sólida que puede ser cemento, betún, asfalto o materiales aglutinantes termoplásticos ([Li et al., 2019](#)).

Métodos químicos

Los métodos químicos incluyen el uso de reactivos para reducir la movilidad o inmovilizar los MMT's ([Song et al., 2017](#)). Los principales métodos químicos son estabilización, vitrificación y el lavado de suelo con compuestos químicos como surfactantes, codisolventes, ciclodextrinas, agentes quelantes y ácidos orgánicos ([Jankaite y Vasarevicius, 2005](#); [Derakhshan et al., 2018](#); [Li et al., 2019](#)). Existen estudios que han demostrado que la adición de compuestos químicos tiene efectos positivos en la inmovilización de MMT's. Por ejemplo, [Hodson et al. \(2000\)](#) indicaron que la adición de apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$) finamente molida tiene el potencial de inmovilizar los MMT's en los suelos y reducir la biodisponibilidad de estos elementos mediante la formación de fosfatos metálicos. Por otra parte, la adición de otros compuestos químicos a base de calcio como óxidos, hidróxidos y carbonatos han

demostrado ser rentables en la inmovilización de MMT's y amigables con el medio ambiente. Algunas fuentes de estos compuestos pueden ser el cascarón de huevo ([Soares et al., 2015](#)), conchas de invertebrados ([Ok et al., 2010](#); [Otero et al., 2015](#); [Islam et al., 2017](#)) y la cal, que es el compuesto más utilizado ([Lim et al., 2013](#)).

Otro de los métodos químicos utilizados es la vitrificación la cual estabiliza los MMT's mediante la formación de cristales de vidrio amorfo. Esta técnica utiliza la adición de precursores formadores de vidrio como el ácido silícico (H_4SiO_4), el ácido bórico (H_3BO_3), el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el óxido de aluminio (Al_2O_3), los cuales se mezclan con el suelo ([Guo et al., 2006](#)). La mezcla resultante se calienta a 1400-2000 °C ([Yao et al., 2012](#)). El vidrio resultante inmoviliza los MMT's restringiendo su biodisponibilidad ([Navarro, 2012](#)). El suministro de energía térmica puede ser de tres tipos; vitrificación eléctrica, vitrificación térmica y la vitrificación por plasma. En la primera se aplica electricidad de alto voltaje a electrodos de grafito insertados en el suelo contaminado. En la segunda se aplica una fuente de calor externa como la radiación de microondas o gas natural para calentar una retorta rotatoria que contiene suelos contaminado y, la tercera, la alta temperatura se logra a través del plasma de gas inducido por descarga eléctrica ([Khan et al., 2004](#)).

La agencia de protección al medio ambiente estadounidense ha recomendado el lavado de suelos utilizando compuestos químicos en solución ([USEPA, 1990](#); [Wood et al., 1990](#); [Chu y Chan, 2003](#); [Gao et al., 2003](#); [USEPA, 2007](#); [Maturi y Reddy, 2008](#); [Zhang et al., 2009](#)). Los agentes surfactantes (e.g dodecilsulfato sódico ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$), Bromuro de hexadeciltrimetilamonio (CTAB) y Polysorbate 80 ($\text{C}_{24}\text{H}_{44}\text{O}_6(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$)) han demostrado resultados eficaces para remover los MMT's en suelos afectados ([Sun et al., 2011](#)). Algunos autores han recomendado el agua como un excelente agente de lavado ([Dermont et al., 2008](#)). Sin embargo, [Maity et al. \(2013\)](#) y [Wei et al. \(2011\)](#) mostraron mejores resultados en la remoción de MMT's, utilizando saponina y agentes quelantes respectivamente. El ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) ha sido

reportado como el agente quelante más eficiente para la eliminación de MMT's de suelos contaminados (Leštan *et al.*, 2008). Además, durante la aplicación de EDTA se ha observado baja biodegradabilidad de los suelos, alta eficiencia de remoción de MMT's e impactos reducidos en la actividad de enzimas y microorganismos del suelo (Qiao *et al.*, 2017). Otros experimentos han utilizado agentes quelantes como el ácido etilendiaminodisuccínico (EDDS), ácido nitrilotriacético y ácidos orgánicos de bajo peso molecular como el oxálico y cítrico en la solubilización del Cu, Cr y As (Almaroai *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2013).

Métodos biológicos

Los métodos biológicos han sido utilizados en las últimas décadas en la remediación de suelos afectados con MMT's para restaurar los ecosistemas, cuyos resultados han mostrado ser eficaces. Los métodos de remediación biológicos han sido englobados bajo el concepto de biorremediación (Ramachandran *et al.*, 2013). Los métodos de biorremediación utilizan plantas, microorganismos o la combinación de ambos para remover, estabilizar o inmovilizar los MMT's (Ayangbenro y Babalola, 2017). De acuerdo con Ojuederie y Babalola (2017), estas técnicas han mostrado ser más rentables en la eliminación de MMT's en comparación con los métodos químicos y físicos convencionales, que a menudo son muy costosos. La biorremediación con plantas ha sido ampliamente utilizada en el tratamiento de suelos contaminados con MMT's. A la biorremediación con plantas también se conoce como fitorremediación (Ali *et al.*, 2013). La fitorremediación incluye una serie de procesos como la fitoextracción, fitofiltración, fitoestabilización y fitovolatilización (Alkorta *et al.*, 2004). Estos métodos son más recomendados cuando los MMT's cubren un área amplia y cuando están dentro de la zona rizosférica (Chibuike y Obiora, 2014).

El proceso de fitoextracción consiste en la absorción de los MMT's por las raíces de las plantas y su posterior translocación a sus partes aéreas, promoviendo la remoción de MMT's del suelo a largo plazo (Bhargava *et al.*, 2012). La

fitofiltración incluye la rizofiltración (uso de raíces de plantas), la blastofiltración (uso de plántulas) o la caulofiltración (uso de brotes de plantas) (Mesjasz-Przybyłowicz *et al.*, 2004). La fitoestabilización es un método que retiene los MMT's en las raíces de las plantas mediante la adsorción, absorción y la formación de complejos metálicos reduciendo la movilidad de la raíz hacia las partes aéreas de las plantas (tallos, hojas, frutos) con lo que se disminuye su ingreso a las cadenas tróficas (Barceló y Poschenrieder, 2003; Erakhrumen y Agbontalor, 2007; Radziemska *et al.*, 2018; Bakshe y Jugade, 2023). La fitovolatilización se refiere a la absorción de MMT's como Se y Hg por las raíces de las plantas, su conversión a estado gaseoso y su posterior liberación a la atmósfera influenciado por el proceso de evapotranspiración de las plantas (Kong y Glick, 2017; Naveed *et al.*, 2023).

La biorremediación con microorganismos para suelos contaminados con MMT's utiliza bacterias, hongos, levaduras y algas (Coelho *et al.*, 2015). Estos microorganismos han demostrado ser eficaces en la inmovilización de MMT's mediante procesos como precipitación, biosorción y secuestro de MMT's por metalotioneínas y fitoquelatinas (Ojuederie y Babalola, 2017). Algunos microorganismos utilizados en la biorremediación de suelos afectados con MMT's son *Sporosarcina ginsengisoli* (Achal *et al.*, 2012), *Pseudomonas putida* (Balamurugan *et al.*, 2014) y *Bacillus subtilis* (Imam *et al.*, 2016). El uso de consorcios de microorganismos, aumenta la eficacia de la biorremediación (Kang *et al.*, 2016). Lo anterior se basa en los resultados obtenidos del efecto sinérgico de las bacterias *Viridibacillus arenosi* B-21, *Sporosarcina soli* B-22, *Enterobacter cloacae* KJ-46 y *E. cloacae* KJ-47 en suelos afectados con Cd, Cu, y Pb. Los hongos micorrízicos se han utilizado en la remediación de suelos contaminados por MMT's, cuyos resultados obtenidos muestran que estos microorganismos son eficaces debido a que las micorrizas emplean métodos como la acidificación, la inmovilización y la modificación de los exudados rizosféricos, secuestro de hifas y precipitación química (Hristozkova *et al.*, 2017).

Estudios realizados por [Cornejo et al. \(2013\)](#) y [Bhalerao \(2013\)](#) indican que los hongos micorrízicos pueden ser aislados de suelos afectados con MMT's. Estos microorganismos autóctonos tienen mayor resistencia a la toxicidad de los MMT's que los aislados de suelos no contaminados, debido a que su tolerancia a esas condiciones los hace más eficaces que los adaptados en laboratorios, lo que puede servir como una herramienta biotecnológica potencial para la restauración exitosa de ecosistemas deteriorados.

Por otra parte, se ha documentado el uso de levaduras con fines de biorremediación, principalmente de la levadura de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*) debido a su capacidad de biosorción de MMT's en comparación con otros biomateriales ([Soares y Soares, 2012](#)). Algunos estudios han reportado la capacidad de este microorganismo de separar especies de MMT's en función de su estado de oxidación, como $\text{Se}^{+4, +6}$, el $\text{Sb}^{+3, +5}$, así como el Hg orgánico e inorgánico ([Madrid et al., 1995](#); [Pérez-Corona et al., 1997](#)).

Las microalgas son microorganismos que han mostrado buenos resultados en la remoción de MMT's mediante dos mecanismos. El primer mecanismo es la adsorción física a la superficie celular debido a que las microalgas cuentan con alta afinidad de unión a MMT's por su gran superficie de sitios de unión ([Cameron et al., 2018](#)). El segundo mecanismo es por biosorción, el cual se basa en el transporte intracelular de MMT's para su quelación y reducción mediante antioxidantes y enzimas reductoras ([Gómez-Jacinto et al., 2015](#)).

Ventajas y desventajas de los métodos de remediación

Métodos físicos

Los métodos físicos presentan muchas limitantes en cuanto a su costo y su beneficio. Por ejemplo, los métodos de reemplazo representan una gran carga de trabajo y un alto costo debido a que necesitan cantidades enormes de material particulado libre de MMT's para diluir o recubrir el suelo afectado y este método solo puede ser efectivo en suelos cuya área es pequeña ([Zhou et](#)

[al., 2004](#); [Li et al., 2019](#)). Las barreras de lechada, bentonita o cemento han mostrado resultados aceptables al restringir el movimiento de los MMT's hacia horizontes inferiores del suelo ([Mulligan, 2001](#); [Jankaite y Vasarevicius, 2005](#)). Sin embargo, la impermeabilidad de las barreras de bentonita disminuye de manera significativa en suelos con altas concentraciones de creosota, sales solubles de cobre, cromo, arsénico o boratos, fosfatos y amoníaco ([USEPA, 1997](#)). Los métodos térmicos no eliminan los MMT's por completo, sino que los transfiere del suelo a la atmósfera donde pueden volver a ingresar al suelo continuando con su ciclo en la cadena trófica ([Li et al., 2010](#); [Karami y Shamsuddin, 2010](#); [Dixit et al., 2015](#)). Los métodos de electrocinética son efectivos en suelos arcillosos y resultan contraproducentes, ya que requieren de mucho tiempo y destruyen el entorno natural original, además los objetos metálicos enterrados desvían el flujo de corriente y no son efectivos si las interferencias son abundantes ([Mulligan et al., 2001](#); [Alshawabkeh y Bricka, 2013](#); [Ramalingam, 2013](#)). El método de solidificación tiene un costo tan alto que a menudo hace que este método no sea rentable y sea contraproducente debido a que encapsula MMT's pero también micronutrientes y macronutrientes del suelo que pueden afectar al desarrollo de las plantas ([Li et al., 2019](#)).

Métodos químicos

La técnica de vitrificación se limita a un volumen de suelo bajo (144 m² y 6 m de profundidad) y su costo es muy elevado (330- 425 dólares por tonelada) ([FRTR, 2012](#); [Meuser, 2012](#); [Navarro, 2012](#); [Liu et al., 2018](#)). El método es eficaz en suelos que contienen concentraciones entre 2 y 5 % de cationes monovalentes (ej. Na^+ y K^+) y no funciona en suelos cuya materia orgánica y humedad sea mayor al 7% y 10% respectivamente y exista la presencia de compuestos orgánicos volátiles o inflamables ([Liu et al., 2018](#)). La temperatura del método de vitrificación (600-1400 °C) daña de manera significativa la microbiota del suelo, elimina compuestos orgánicos y puede volatilizar elementos tóxicos como el Hg. Asimismo, los cristales amorfos de vidrio además de secuestrar MMT's, también pueden secuestrar

micronutrientes y macronutrientes dejando el suelo inerte (Wuana y Okieimen, 2011). Las técnicas de lavado de suelos con surfactantes mostraron una mayor tasa de eliminación de metales como Cu, Zn, Pb, Ni y Cd (SDS > CTAB > Tween80). Sin embargo, estas condiciones solo funcionaron en suelos arenosos y no en suelos arcillosos (Sun *et al.*, 2011). El EDTA ha mostrado buenos resultados en la remoción de MMT's de suelos y el que menos efectos adversos ejerce en la biota y microbiota del suelo (Leštan *et al.*, 2008; Qiao *et al.*, 2017). Sin embargo, su uso puede favorecer la movilización de MMT's hacia la raíz de las plantas cultivadas en el suelo tratado (Almaroai *et al.*, 2012). El uso de ácidos orgánicos (oxálico, cítrico, fórmico, acético, málico, succínico, malónico, maleico, láctico, aconítico y fumárico) pueden ser los más indicados para remover MMT's. Debido a que estos reactivos son productos naturales de exudados de raíces, secreciones microbianas y de la descomposición de plantas y animales (Naidu y Harter, 1998; Wuana y Okieimen, 2011).

Métodos biológicos

El uso de algunos microorganismos ha dado buenos resultados en la inmovilización de MMT's mediante la precipitación de algunos minerales. Por ejemplo, *S. ginsengisoli* CR5 mostró eficiencia en la precipitación inducida de calcita para la biorremediación de As (Achal *et al.*, 2012). Bacillos como *Saccharomyces cerevisiae* y *Bacillus subtilis*, mostraron resultados eficientes en la biosorción e inmovilización de Cd^{+2} (92.68%) y de Hg^{+2} (90.48%) del suelo contaminado en 21 días de incubación (Imam *et al.*, 2016). El efecto sinérgico de las mezclas bacterianas en la biorremediación de suelos contaminados ha mostrado una mayor eficiencia. Kang *et al.* (2016) registraron una remediación del 98.3 % para Pb, 85.4 % para Cd y 5.6 % para Cu utilizando un consorcio bacteriano compuesto de *Viridibacillus arenosi* B-21, *Sporosarcina soli* B-22, *Enterobacter cloacae* KJ-46 y *E. cloacae* KJ-47. Otras mezclas de hongos micorrízicos, algas y cianobacterias han ayudado a resistir el estrés en plantas expuestas a MMT's (Hristozkova *et al.*, 2017). El estudio realizado por Cornejo *et al.* (2013) indica que la asociación

de hongos micorrízicos (*Claroideoglomus claroideum*, *Imperata condensata* y *Rhizophagus irregularis*) con raíces de zanahoria ayudaron a las plantas a sobrevivir en ambientes contaminados con Cu, almacenando el Cu en sus esporas.

La fitorremediación (fitoextracción, fitofiltración, fitoestabilización, fitovolatilización y fitodegradación) ha mostrado resultados aceptables en el tratamiento de suelos contaminados con MMT's (Kong y Glick, 2017). Las familias de angiospermas más utilizadas en la fitorremediación incluyen *Brassicaceae*, *Scrophulariaceae*, *Asteraceae*, *Lamiaceae*, *Fabaceae* y *Euphorbiaceae* (Gao *et al.*, 2003; Maturi y Reddy, 2008; Jabeen y Iqbal, 2009; Ashraf *et al.*, 2017). Sin embargo, Rajkumar *et al.* (2009) indican que la mayoría de las plantas no son adecuadas para aplicaciones de fitorremediación de campo debido a que son de crecimiento muy lento y de biomasa muy baja.

La combinación de plantas y microorganismos realiza una remoción más rápida y eficiente de MMT's en suelos afectados (Vangronsvelt *et al.*, 2009). Existen estudios que indican ampliamente el uso de microorganismos rizosféricos que ayudan al crecimiento de las plantas y a resistir el estrés ocasionado por la exposición a MMT's (Wuana y Okieimen, 2011). Incluso, algunos estudios indican que la combinación de hongos micorrízicos y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la rizósfera pueden dar resultados aceptables en la fitorremediación (Zhang *et al.*, 2009; Brereton *et al.*, 2020). El uso de *Saccharomyces cerevisiae* para la biorremediación de MMT's ha mostrado resultados muy buenos debido a su facilidad de cultivo a gran escala sin fermentación, los bajos costos, su fácil manipulación a nivel molecular y su alta producción de biomasa. Sin embargo, para que el microorganismo de buenos resultados debe existir condiciones controladas de pH, temperatura, tasa de inoculación, acondicionamientos previos de glucosa y solventes, además no se obtienen buenos resultados si las concentraciones de MMT's son menores a 0.5 ppm (Massoud *et al.*, 2019). Las microalgas son eficaces en la remoción de MMT's debido a que se puede utilizar células vivas o muertas

(biomasa). Los reportes indican que este método es amigable con el medio ambiente y los beneficios son robustos en la remoción de B, Co, Cu, Fe, Mo, Mn y Zn, pero no así para la remoción de As, Cd, Cr, Pb y Hg (Sun *et al.*, 2015; Abinandan *et al.*, 2019).

Conclusión

A pesar de la efectividad que han demostrado los métodos físicos, los altos costos y la elevada carga de trabajo que se necesita los hace los métodos menos rentables para su implementación.

Los métodos químicos son eficaces cuando se aplican compuestos como hidróxido de calcio, cal y fosfatos. El lavado de suelos por medio de soluciones químicas difiere considerablemente para diferentes tipos de suelo. Sin embargo, el uso de EDTA resultó ser el método más eficaz, de igual manera para lavados menos dañinos, se sugiere el uso de ácidos orgánicos.

Los métodos biológicos han demostrado ser una alternativa rentable y ecológica y pueden representar una alternativa eficaz a los métodos físicos y químicos para la descontaminación de suelos afectados con MMT's. Sin embargo, la combinación de la fitorremediación con la fitoextracción asistida por quelatos y microbios pueden dar resultados más favorables en la remoción de MMT's de suelos afectados a gran escala.

Agradecimientos

Esta investigación se llevó a cabo gracias al apoyo y subvención del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del gobierno de México (CONACYT) con número de beca 780882. Este artículo se deriva de la tesis "Potencial afectación de los Elementos Tóxicos contenidos en jitomate (*Solanum lycopersicum*) cultivado en suelos contaminados con residuos mineros: Estudios geoquímico con propuesta de remediación de suelos", desarrollada en el Doctorado en Ciencias Ambientales del Centro de Ciencias de Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Guerrero, México.

Bibliografía

- Abinandan, S., Subashchandrabose, S.R., Venkateswarlu, K., Perera, I.A., Megharaj, M. (2019). Acid-tolerant microalgae can withstand higher concentrations of invasive cadmium and produce sustainable biomass and biodiesel at pH 3.5. *Bioresource technology*, 281, 469-473.
- Achal, V., Pan, X., Fu, Q., Zhang, D. (2012). Biomineralization based remediation of As (III) contaminated soil by *Sporosarcina ginsengisoli*. *Journal of hazardous materials*, 201, 178-184.
- Adriano, D.C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals*, Springer, New York, NY, USA, 2nd edition.
- Ali, B., Wang, B., Ali, S., Ghani, M.A., Hayat, M. T., Yang, C., Xu, L., Zhou, W.J. (2013). 5-Aminolevulinic acid ameliorates the growth, photosynthetic gas exchange capacity, and ultrastructural changes under cadmium stress in *Brassica napus* L. *Journal of Plant Growth Regulation*, 32, 604-614.
- Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J.M., Amezcua, I., Albizu, I., Garbisu, C. (2004). Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 3, 71-90.
- Almaroai, Y.A., Usman, A.R., Ahmad, M., Kim, K.R., Moon, D.H., Lee, S.S., Ok, Y.S. (2012). Effects of synthetic chelators and low-molecular-weight organic acids on chromium, copper, and arsenic uptake and translocation in maize (*Zea mays* L.). *Soil science*, 177, 655-663.
- Alshawabkeh, A. N., Bricka, R. M. (2013). Basics and application of electrokinetics remediation, *Remediation engineering of contaminated soils* 95-111.
- Ashraf, M.A., Hussain, I., Rasheed, R., Iqbal, M., Riaz, M., Arif, M.S. (2017). Advances in microbe-assisted reclamation of heavy metal contaminated soils over the last decade: a review. *Journal of Environmental Management*, 198, 132-143.

- Ayangbenro, A.S., Babalola, O.O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: a review of microbial biosorbents. *International journal of environmental research and public health*, 14, 94.
- Bakshe, P., Jugade, R. (2023). Phytostabilization and rhizofiltration of toxic heavy metals by heavy metal accumulator plants for sustainable management of contaminated industrial sites: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100293.
- Balamurugan, D., Udayasooriyan, C., Kamaladevi, B. (2014). Chromium (VI) reduction by *Pseudomonas putida* and *Bacillus subtilis* isolated from contaminated soils. *International Journal of Environmental Sciences*, 5, 522.
- Barceló, J., Poschenrieder, C. (2003). Phytoremediation: principles and perspectives. *Contributions to Science*, 333-344.
- Bhalerao, S.A. (2013). Arbuscular mycorrhizal fungi: a potential biotechnological tool for phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *International Journal of Science and Nature*, 4, 1-15.
- Bhargava, A., Carmona, F.F., Bhargava, M., Srivastava, S. (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of environmental management*, 105, 103-120.
- Brereton, N.J.B., Gonzalez, E., Desjardins, D., Labrecque, M., Pitre, F. E. (2020). Co-cropping with three phytoremediation crops influences rhizosphere microbiome community in contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 711, 135067.
- Cameron, H., Mata, M.T., Riquelme, C. (2018). The effect of heavy metals on the viability of *Tetraselmis marina* AC16-MESO and an evaluation of the potential use of this microalga in bioremediation. *PeerJ*, 6, e5295.
- Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A. (2006). Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes. *Environmental. Pollution*, 144, 84-92.
- Chang, T.C., Yen, J.H. (2006). On-site mercury-contaminated soils remediation by using thermal desorption technology. *Journal of hazardous materials*, 128, 208-217.
- Chibuike, G.U., Obiora, S.C. (2014). Heavy metal polluted soils: effect on plants and bioremediation methods. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014, 1-12.
- Chu, W., Chan, K. H. (2003). The mechanism of the surfactant-aided soil washing system for hydrophobic and partial hydrophobic organics. *Science of the Total Environment*, 307, 83-92.
- Coelho, L.M., Rezende, H.C., Coelho, L.M., De Sousa, P.A., Melo, D.F., Coelho, N.M. (2015). Bioremediation of polluted waters using microorganisms. *Advances in bioremediation of wastewater and polluted soil*, 10, 60770.
- Cornejo, P., Pérez-Tienda, J., Meier, S., Valderas, A., Borie, F., Azcón-Aguilar, C., Ferrol, N. (2013). Copper compartmentalization in spores as a survival strategy of arbuscular mycorrhizal fungi in Cu-polluted environments. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 925-928.
- Derakhshan Nejad, Z., Jung, M.C., Kim, K.H. (2018). Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology. *Environmental Geochemistry and Health*, 40, 927-953.
- Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., Richer-Lafleche, M. (2008). Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications. *Journal of hazardous materials*, 152, 1-31.
- Dixit, R., Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U. B., Sahu, A., Shukla, R., Singh, B.P., Rai, J.P., Sharma, P.K., Lade, H., Paul, D. (2015). Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes. *Sustainability*, 7, 2189-2212.
- FRTR, 2012. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0. Federal Remediation Technologies Roundtable, Washington, DC.
- Gao, Y., He, J., Ling, W., Hu, H., Liu, F. (2003). Effects of organic acids on copper and cadmium desorption from contaminated soils. *Environment International*, 29, 613-618.
- Gómez-Jacinto, V., García-Barrera, T., Gómez-Ariza, J.L., Garbayo-Nores, I., Vélchez-Lobato, C. (2015). Elucidation of the defence mechanism in microalgae *Chlorella sorokiniana* under mercury exposure. Identification of Hg-

- phytochelatins. *Chemico-Biological Interactions*, 238, 82-90.
- Guo, G., Zhou, Q., Ma, L.Q. (2006). Availability and assessment of fixing additives for the in situ remediation of heavy metal contaminated soils: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 116, 513-528.
- Gupta, S.K., Herren, T., Wenger, K., Krebs, R., Hari, T. (2020). In situ gentle remediation measures for heavy metal-polluted soils. In *Phytoremediation of contaminated soil and water* (303-322).
- Hodson, M.E., Valsami-Jones, É., Cotter-Howells, J.D. (2000). Bonemeal additions as a remediation treatment for metal contaminated soil. *Environmental Science & Technology*, 34, 3501-3507.
- Hristozkova, M., Gigova, L., Geneva, M., Stancheva, I., Vasileva, I., Sichanova, M., Mincheva, J. (2017). Mycorrhizal fungi and microalgae modulate antioxidant capacity of basil plants. *Journal of Plant Protection Research*, 57, 417-426.
- Huang, Y.T., Hseu, Z.Y., Hsi, H.C. (2011). Influences of thermal decontamination on mercury removal, soil properties, and repartitioning of coexisting heavy metals. *Chemosphere*, 84, 1244-1249.
- Imam, S.A., Rajpoot, I.K., Gajjar, B., Sachdeva, A. (2016). Comparative study of heavy metal bioremediation in soil by *Bacillus subtilis* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Indian Journal of Science and Technology*, 9, 1-7.
- Islam, M.N., Taki, G., Nguyen, X.P., Jo, Y.T., Kim, J., Park, J.H. (2017). Heavy metal stabilization in contaminated soil by treatment with calcined cockle shell. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 7177-7183.
- Islam, M.S., Ahmed, M.K., Al-Mamun, M.H., Islam, S.M.A. (2019). Sources and ecological risks of heavy metals in soils under different land uses in Bangladesh. *Pedosphere*, 29, 665-675.
- Jabeen, R., Ahmad, A., Iqbal, M. (2009). Phytoremediation of heavy metals: physiological and molecular mechanisms. *The Botanical Review*, 75, 339-364.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B., Beeregowda, K.N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary toxicology*, 7, 60.
- Jankaite, A., Vasarevičius, S. (2005). Remediation technologies for soils contaminated with heavy metals. *Journal of environmental engineering and landscape management*, 13, 109-113.
- Kang, C.H., Kwon, Y.J., So, J.S. (2016). Bioremediation of heavy metals by using bacterial mixtures. *Ecological engineering*, 89, 64-69.
- Karami, A., Shamsuddin, Z.H. (2010). Phytoremediation of heavy metals with several efficiency enhancer methods. *African Journal of Biotechnology*, 9, 3689-3698.
- Khan, F.I., Husain, T., Hejazi, R. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of environmental management*, 71, 95-122.
- Khan, I., Ghani, A., Rehman, A.U., Awan, S.A., Noreen, A., Khalid, I. (2016). Comparative analysis of heavy metal profile of *Brassica campestris* (L.) and *Raphanus sativus* (L.) irrigated with municipal waste water of sargodha city. *Journal of Clinical Toxicology*, 6, 2161-0495.
- Kim, G.N., Jung, Y.H., Lee, J.J., Moon, J.K., Jung, C.H. (2008). An analysis of a flushing effect on the electrokinetic-flushing removal of cobalt and cesium from a soil around decommissioning site. *Separation and purification technology*, 63, 116-121.
- Kim, G.N., Kim, S.S., Moon, J.K., Hyun, J.H. (2015). Removal of uranium from soil using full-sized washing electrokinetic separation equipment. *Annals of Nuclear Energy*, 81, 188-195.
- Kim, J.O., Lee, Y.W., Chung, J. (2013). The role of organic acids in the mobilization of heavy metals from soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17, 1596-1602.
- Kirpichtchikova, T.A., Manceau, A., Spadini, L., Panfili, F., Marcus, M.A., Jacquet, T. (2006). Speciation and solubility of heavy metals in contaminated soil using X-ray microfluorescence, EXAFS spectroscopy, chemical extraction, and thermodynamic

- modeling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 2163-2190.
- Kong, Z., Glick, B.R. (2017). The role of plant growth-promoting bacteria in metal phytoremediation. *Advances in microbial physiology*, 71, 97-132.
- Leita, L., De Nobili, M., Muhlbachova, G., Mondini, C., Marchiol, L., Zerbi, G. (1995). Bioavailability and effects of heavy metals on soil microbial biomass survival during laboratory incubation. *Biology and Fertility of Soils*, 19, 103-108.
- Leštan, D., Luo, C.L., Li, X.D. (2008). The use of chelating agents in the remediation of metal-contaminated soils: a review. *Environmental Pollution*, 153, 3-13.
- Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., Han, W. (2019). A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 28, 380-394.
- Li, D., Sun, D., Hu, S., Hu, J., Yuan, X. (2016). Conceptual design and experiments of electrochemistry-flushing technology for the remediation of historically Cr (VI)-contaminated soil. *Chemosphere*, 144, 1823-1830.
- Li, J., Zhang, G.N., Li, Y. (2010). Review on the remediation technologies of POPs. *Hebei Environmental Science*, 65, 1295-1299.
- Lim, J.E., Ahmad, M., Lee, S.S., Shope, C.L., Hashimoto, Y., Kim, K.R., Usman, A.R.A., Yang, J.E., Ok, Y.S. (2013). Effects of lime-based waste materials on immobilization and phytoavailability of cadmium and lead in contaminated soil. *Clean-Soil, Air, Water*, 41, 1235-1241.
- Ling, W., Shen, Q., Gao, Y., Gu, X., Yang, Z. (2007). Use of bentonite to control the release of copper from contaminated soils. *Soil Research*, 45, 618-623.
- Liu, L., Li, W., Song, W., Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the total environment*, 633, 206-219.
- Lwin, C.S., Seo, B.H., Kim, H.U., Owens, G., Kim, K.R. (2018). Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality—A critical review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64, 156-167.
- Madrid, Y., Cabrera, C., Perez-Corona, T., Camara, C. (1995). Speciation of methylmercury and Hg (II) using baker's yeast biomass (*Saccharomyces cerevisiae*). Determination by continuous flow mercury cold vapor generation atomic absorption spectrometry. *Analytical chemistry*, 67, 750-754.
- Maity, J.P., Huang, Y.M., Fan, C.W., Chen, C.C., Li, C. Y., Hsu, C.M., Chang, Y.F., Wu, C.I., Chen, C.Y., Jean, J.S. (2013). Evaluation of remediation process with soapberry derived saponin for removal of heavy metals from contaminated soils in Hai-Pu, Taiwan. *Journal of Environmental Sciences*, 25, 1180-1185.
- Maslin, P., Maier, R.M. (2000). Rhamnolipid-enhanced mineralization of phenanthrene in organic-metal co-contaminated soils. *Bioremediation Journal*, 4, 295-308.
- Massoud, R., Hadiani, M.R., Hamzehlou, P., Khosravi-Darani, K. (2019). Bioremediation of heavy metals in food industry: Application of *Saccharomyces cerevisiae*. *Electronic Journal of Biotechnology*, 37, 56-60.
- Maturi, K., Reddy, K.R. (2008). Extractants for the removal of mixed contaminants from soils. *Soil and sediment contamination*, 17, 586-608.
- Mesjasz-Przybyłowicz, J., Nakonieczny, M., Migula, P., Augustyniak, M., Tarnawska, M., Reimold, W.U., Koeberl, C., Przybyłowicz, W., Głowacka, E. (2004). Uptake of cadmium, lead nickel and zinc from soil and water solutions by the nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii*. *Acta Biologica Cracoviensia Series. Botica*, 46, 75-85.
- Meuser, H. (2012). *Soil remediation and rehabilitation: treatment of contaminated and disturbed land* (Vol. 23). Springer Science and Business Media.
- Mulligan, C.N., Yong, R.N., Gibbs, B.F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology*, 60, 193-207.
- Naidu, R., Harter, R.D. (1998). Effect of different organic ligands on cadmium sorption by and

- extractability from soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 644-650.
- Navarro, A. (2012). Effect of sludge amendment on remediation of metal contaminated soils. *Minerals*, 2, 473-492.
- Naveed, S., Oladoye, P.O., Alli, Y.A. (2023). Toxic heavy metals: A bibliographic review of risk assessment, toxicity, and phytoremediation technology. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 2, 100018.
- Ng, Y.S., Gupta, B.S., Hashim, M.A. (2014). Performance evaluation of two-stage electrokinetic washing as soil remediation method for lead removal using different wash solutions. *Electrochimica Acta*, 147, 9-18.
- Ojuederie, O.B., Babalola, O.O. (2017). Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: a review. *International journal of environmental research and public health*, 14, 1504.
- Ok, Y.S., Oh, S.E., Ahmad, M., Hyun, S., Kim, K.R., Moon, D.H., Lee, S.S., Lim, K.J., Jeon, W.T., Yang, J.E. (2010). Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils. *Environmental Earth Sciences*, 61, 1301-1308.
- Otero, M., Cutillas-Barreiro, L., Nóvoa-Muñoz, J. C., Arias-Estévez, M., Fernández-Sanjurjo, M. J., Álvarez-Rodríguez, E., Núñez-Delgado, A. (2015). Cr (VI) sorption/desorption on untreated and mussel-shell-treated soil materials: fractionation and effects of pH and chromium concentration. *Solid Earth*, 6, 373-382.
- Peralta-Videa, J.R., Lopez, M.L., Narayan M., Saupe, G., Gardea-Torresdey, J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain. *International Journal of Biochemistry and Cell Biology*, 41, 1665-1677.
- Pérez-Corona, T., Madrid, Y., Cámara, C. (1997). Evaluation of selective uptake of selenium (Se (IV) and Se (VI)) and antimony (Sb (III) and Sb (V)) species by baker's yeast cells (*Saccharomyces cerevisiae*). *Analytica Chimica Acta*, 345, 249-255.
- Qian, S.Q., Liu, Z. (2000). An overview of development in the soil-remediation technologies. *Chemical Industrial and Engineering Process*, 4, 20.
- Qiao, J., Sun, H., Luo, X., Zhang, W., Mathews, S., Yin, X. (2017). EDTA-assisted leaching of Pb and Cd from contaminated soil. *Chemosphere*, 167, 422-428.
- Radziemska, M., Koda, E., Bilgin, A., Vaverková, M.D. (2018). Concept of aided phytostabilization of contaminated soils in postindustrial areas. *International journal of environmental research and public health*, 15, 24.
- Rai, P.K., Lee, J., Kailasa, S.K., Kwon, E.E., Tsang, Y.F., Ok, Y.S., Kim, K.H. (2018). A critical review of ferrate (VI)-based remediation of soil and groundwater. *Environmental research*, 160, 420-448.
- Rajkumar, M., Ae, N., Freitas, H. (2009). Endophytic bacteria and their potential to enhance heavy metal phytoextraction. *Chemosphere*, 77, 153-160.
- Ramachandran, P., Sundharam, R., Palaniyappan, J., Munusamy, A.P. (2013). Potential process implicated in bioremediation of textile effluents: a review. *Advances in Applied Science Research*, 4, 131-145.
- Ramalingam, V. (2013). Electrokinetic remediation. The International Information Center for Geotechnical Engineers. [Electrokinetic Remediation | Geoengineer.org](http://ElectrokineticRemediation|Geoengineer.org)
- Ramamoorthy, D. (2015). Assessment of heavy metal pollution and its impacts on soil physical, chemical properties and β -glucosidase activities in agricultural lands, Puducherry region. *Pol J Environ Stud*, 25, 1045-1051.
- Erakhrumen, A.A., Agbontalor, A. (2007). Phytoremediation: an environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation in developing countries. *Educational Research and Review*, 2, 151-156.
- Roh, Y., Edwards, N.T., Lee, S.Y., Stiles, C.A., Armes, S., Foss, J.E. (2000). Thermal-treated soil for mercury removal: Soil and phytotoxicity tests. *Journal of Environmental Quality*, 29, 415-424.
- Soares, E.V., Soares, H.M. (2012). Bioremediation of industrial effluents containing heavy metals using brewing cells of *Saccharomyces cerevisiae* as a green technology: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 19, 1066-1083.

- Soares, M.A.R., Quina, M.J., Quinta-Ferreira, R. M. (2015). Immobilization of lead and zinc in contaminated soil using compost derived from industrial eggshell. *Journal of Environmental Management*, 164, 137-145.
- Song, B., Zeng, G., Gong, J., Liang, J., Xu, P., Liu, Z., Zhang, Y., Zhang, C., Cheng, M., Liu, Y., Ye, S., Yi, H., Ren, X. (2017). Evaluation methods for assessing effectiveness of in situ remediation of soil and sediment contaminated with organic pollutants and heavy metals. *Environment International*, 105, 43-55.
- Sun, H., Wang, H., Qi, J., Shen, L., Lian, X. (2011). Study on surfactants remediation in heavy metals contaminated soils. *IEEE. In 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection*, 3, 1862-1865.
- Sun, J., Cheng, J., Yang, Z., Li, K., Zhou, J., Cen, K. (2015). Microstructures and functional groups of *Nannochloropsis* sp. cells with arsenic adsorption and lipid accumulation. *Bioresource Technology*, 194, 305-311.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) 2007. Integrated Risk Information System-database. USEPA, Washington, D. C.
- United States. Environmental Protection Agency. (1990). Engineering bulletin: Soil washing treatment.
- Ussiri, D.A.N, Lal, R. (2005). Carbon sequestration in reclaimed minesoils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24, 151-165.
- Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., Thewys, T., Vassilev, A., Meers, E., Nehnevajova, E., van der Lelie, D., Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*, 16, 765-794.
- Wang, Z., Chen, Y., Wang, S., Yu, Y., Huang, W., Xu, Q., Zeng, L. (2022). Pollution risk assessment and sources analysis of heavy metal in soil from bamboo shoots. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 14806.
- Wei, B., Yang, L. (2010). A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*, 94, 99-107.
- Wei, J., Tao, T., Zhi-Ming, L. (2011). Removal of heavy metal from contaminated soil with chelating agents. *Open Journal of Soil Science*, 1, 70-76.
- Wood, A.L., Bouchard, D.C., Brusseau, M.L., Rao, P.S.C. (1990). Cosolvent effects on sorption and mobility of organic contaminants in soils. *Chemosphere*, 21, 575-587.
- Wuana, R.A., Okieimen, F.E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*, 1, 402647.
- Yao, H., Xu, J., Huang, C. (2003). Substrate utilization pattern, biomass and activity of microbial communities in a sequence of heavy metal-polluted paddy soils. *Geoderma*, 115, 139-148.
- Yao, Z., Li, J., Xie, H., Yu, C. (2012). Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 722-729.
- Zhang, H., Dang, Z., Zheng, L. C., Yi, X.Y. (2009). Remediation of soil co-contaminated with pyrene and cadmium by growing maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 6, 249-258.
- Zhang, X.H., Wang, H., Luo, Q.S. (2001). Electrokinetics in remediation of contaminated groundwater and soils. *Advances in Water Science*, 12, 249-255.
- Zhou, D.M., Hao, X. Z., Xue, Y. (2004). Advances in remediation technologies of contaminated soils. *Ecology and Environmental Science*, 13, 234-242.

Apéndice

Lista de los 103 artículos consultados sobre la problemática general de contaminación de suelos por metales y metaloides tóxicos, así como los métodos de naturaleza física, química y biológica utilizados en la remediación de suelos afectados.

	Título	Autor	Año	Revista	Cuartil	Editorial
1	Acid-tolerant microalgae can withstand higher concentrations of invasive cadmium and produce sustainable biomass and biodiesel at pH 3.5	Abinandan et al.	2019	Bioresource technology	Q1	Elsevier
2	Biomining based remediation of As (III) contaminated soil by <i>Sporosarcina ginsengisoli</i>	Achal et al.	2012	Journal of Hazardous Materials	Q1	Elsevier
3	Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals, Springer, New York, NY, USA, 2nd edition.	Adriano	2003	Reviews of Environmental Contamination and Toxicology	Q1	Springer
4	Aminolevulinic acid ameliorates the growth, photosynthetic gas exchange capacity, and ultrastructural changes under cadmium stress in <i>Brassica napus</i> L.	Ali et al.	2013	Journal of Plant Growth Regulation	Q1	Springer
5	Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic	Alkorta et al.	2004	Reviews in Environmental Science and Biotechnology	Q2	Springer
6	Effects of synthetic chelators and low-molecular-weight organic acids on chromium, copper, and arsenic uptake and translocation in maize (<i>Zea mays</i> L.)	Almaroai et al.	2012	soil science an interdisciplinary approach to soils research	---	---
7	Advances in microbe-assisted reclamation of heavy metal contaminated soils over the last decade: a review	Alshawabkeh y Bricka	2017	Journal of Environmental Management	Q1	Elsevier
8	Advances in microbe-assisted reclamation of heavy metal contaminated soils over the last decade: a review	Ashraf et al.	2017	Journal of Environmental Management	Q1	Elsevier
9	A new strategy for heavy metal polluted environments: a review of microbial biosorbents	Ayangbenro y Babalola	2017	International journal of environmental research and public health	Q2	MDPI
10	Phytostabilization and rhizofiltration of toxic heavy metals by heavy metal accumulator plants for sustainable management of contaminated industrial sites: A comprehensive review	Bakshe y Jugade	2023	Journal of Hazardous Materials Advances	Q1	Elsevier
11	Chromium (VI) reduction by <i>Pseudomonas putida</i> and <i>Bacillus</i>	Balamurugan et al.	2014	International Journal of Environmental Sciences	Q4	CAB Direct

	subtilis isolated from contaminated soils					
12	Arbuscular mycorrhizal fungi: a potential biotechnological tool for phytoremediation of heavy metal contaminated soils	Bhalerao	2013	International Journal of Science and Nature	---	SOCIETY FOR SCIENCE AND NATURE
13	Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals	Bhargava <i>et al.</i>	2012	Journal of environmental management	Q1	Elsevier
14	Co-cropping with three phytoremediation crops influences rhizosphere microbiome community in contaminated soil	Bereton <i>et al.</i>	2020	Science of the Total Environment	Q1	Elsevier
15	The effect of heavy metals on the viability of Tetraselmis marina AC16-MESO and an evaluation of the potential use of this microalga in bioremediation	Cameron <i>et al.</i>	2018	Microbiology	---	PeerJ
16	Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes	Carrillo-González y González-Chávez	2006	Environmental Pollution	Q1	Elsevier
17	On-site mercury-contaminated soils remediation by using thermal desorption technology	Chang y Yen	2006	Journal of Hazardous Materials	Q1	Elsevier
18	Heavy metal polluted soils: effect on plants and bioremediation methods	Chibuike y Obiora	2014	Applied and environmental soil science	Q2	Hindawi Publishing Corporation
19	The mechanism of the surfactant-aided soil washing system for hydrophobic and partial hydrophobic organics	Chu y Chan	2003	Science of the Total Environment	Q1	Elsevier
20	Bioremediation of polluted waters using microorganisms	Coelho <i>et al.</i>	2015	Advances in bioremediation of wastewater and polluted soil	---	---
21	Copper compartmentalization in spores as a survival strategy of arbuscular mycorrhizal fungi in Cu-polluted environments	Cornejo <i>et al.</i>	2013	Soil Biology and Biochemistry	Q1	Elsevier
22	Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology	Derakhshan <i>et al.</i>	2018	Environmental geochemistry and health	Q1	Springer Netherlands
23	Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications	Dermont <i>et al.</i>	2008	Journal of hazardous materials	Q1	Elsevier
24	Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes	Dixit <i>et al.</i>	2015	Sustainability	Q2	MDPI AG
25	Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0.	FRTR	2012	Version 4.0. Federal Remediation Technologies Roundtable	---	---
26	Effects of organic acids on copper and cadmium desorption from contaminated soils	Gao <i>et al.</i>	2003	Environment International	Q1	Elsevier

27	Elucidation of the defence mechanism in microalgae <i>Chlorella sorokiniana</i> under mercury exposure. Identification of Hg-phytochelatins	Gómez-Jacinto <i>et al.</i>	2015	Chemico-Biological Interactions	Q1	Elsevier
28	Availability and assessment of fixing additives for the in situ remediation of heavy metal contaminated soils: a review	Guo <i>et al.</i>	2006	Environmental monitoring and assessment	Q2	Springer Netherlands
29	In situ gentle remediation measures for heavy metal-polluted soils	Gupta <i>et al.</i>	2020	In Phytoremediation of contaminated soil and water	---	Libro
30	Bonemeal additions as a remediation treatment for metal contaminated soil	Hodson <i>et al.</i>	2000	Environmental Science & Technology	Q1	American Chemical Society
31	Mycorrhizal fungi and microalgae modulate antioxidant capacity of basil plants	Hristozkova <i>et al.</i>	2017	Journal of Plant Protection Research	Q2	Polish Academy of Sciences, Committee of Plant Protection
32	Influences of thermal decontamination on mercury removal, soil properties, and repartitioning of coexisting heavy metals	Huang <i>et al.</i>	2011	Chemosphere	Q1	Elsevier
33	Comparative study of heavy metal bioremediation in soil by <i>Bacillus subtilis</i> and <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Imam <i>et al.</i>	2016	Indian Journal of Science and Technology	Q2	Indian Society for Education and Environment
34	Heavy metal stabilization in contaminated soil by treatment with calcined cockle shell	Islam <i>et al.</i>	2017	Environmental Science and Pollution Research	Q2	Springer Science + Business Media
35	Sources and ecological risks of heavy metals in soils under different land uses in Bangladesh	Islam <i>et al.</i>	2019	Pedosphere	Q1	Institute of Soil Science
36	Phytoremediation of heavy metals: physiological and molecular mechanisms	Jabeen <i>et al.</i>	2009	The Botanical Review	Q2	Springer New York
37	Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals	Jaishankar <i>et al.</i>	2014	Interdisciplinary toxicology	Q3	Slovak Toxicology Society SETOX
38	Remediation technologies for soils contaminated with heavy metals	Jankaite y Vasarevičius	2005	Journal of environmental engineering and landscape management	Q3	Vilnius Gediminas Technical University
39	Bioremediation of heavy metals by using bacterial mixtures	Kang <i>et al.</i>	2016	Ecological engineering	Q1	Elsevier
40	Phytoremediation of heavy metals with several efficiency enhancer methods	Karami y Shamsuddin	2010	African Journal of Biotechnology	Q3	Academic Journals
41	An overview and analysis of site remediation technologies	Khan <i>et al.</i>	2004	Journal of environmental management	Q2	Academic Press Inc
42	Comparative analysis of heavy metal profile of <i>Brassica campestris</i> (L.) and <i>Raphanus sativus</i> (L.) irrigated with municipal waste water of sargodha city	Khan <i>et al.</i>	2016	J Clin Toxicol	Q1	Informa Healthcare

43	An analysis of a flushing effect on the electrokinetic-flushing removal of cobalt and cesium from a soil around decommissioning site	<i>Kim et al.</i>	2008	Separation and purification technology	Q2	Elsevier
44	Removal of uranium from soil using full-sized washing electrokinetic separation equipment	<i>Kim et al.</i>	2015	Annals of Nuclear Energy	Q1	Elsevier
45	The role of organic acids in the mobilization of heavy metals from soil	<i>Kim et al.</i>	2013	KSCE Journal of Civil Engineering	Q3	Korean Society of Civil Engineers
46	Speciation and solubility of heavy metals in contaminated soil using X-ray microfluorescence, EXAFS spectroscopy, chemical extraction, and thermodynamic modeling	<i>Kirpichtchikova et al.</i>	2006	Geochimica et Cosmochimica Acta	Q1	Elsevier
47	The role of plant growth-promoting bacteria in metal phytoremediation	<i>Kong y Glick</i>	2017	Advances in microbial physiology	Q2	Academic Press Inc.
48	Bioavailability and effects of heavy metals on soil microbial biomass survival during laboratory incubation	<i>Leita et al.</i>	1995	Biology and Fertility of Soils	Q1	Springer Verlag
49	The use of chelating agents in the remediation of metal-contaminated soils: a review	<i>Leštan et al.</i>	2008	Environmental Pollution	Q1	Elsevier
50	A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques	<i>Li et al.</i>	2019	Soil and Sediment Contamination: An International Journal	---	---
51	Conceptual design and experiments of electrochemistry-flushing technology for the remediation of historically Cr (VI)-contaminated soil	<i>Li et al.</i>	2016	Chemosphere	Q1	Elsevier
52	Review on the remediation technologies of POPs	<i>Li et al.</i>	2010	Hebei Environmental Science	---	---
53	Effects of lime-based waste materials on immobilization and phytoavailability of cadmium and lead in contaminated soil	<i>Lim et al.</i>	2013	Clean–Soil, Air, Water	Q2	Wiley-VCH Verlag
54	Use of bentonite to control the release of copper from contaminated soils	<i>Ling et al.</i>	2007	Soil research	Q1	CSIRO
55	Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability	<i>Liu et al.</i>	2018	Science of the Total Environment	Q1	Elsevier
56	Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality—A critical review.	<i>Lwin et al.</i>	2018	Soil science and plant nutrition	Q2	Taylor and Francis Ltd.
57	Speciation of methylmercury and Hg (II) using baker's yeast biomass (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>). Determination by continuous flow mercury cold vapor generation atomic absorption spectrometry	<i>Madrid et al.</i>	1995	Analytical chemistry	Q1	American Chemical Society
58	Evaluation of remediation process with soapberry derived saponin for removal of heavy metals from contaminated soils in Hai-Pu, Taiwan	<i>Maity et al.</i>	2013	Journal of Environmental Sciences	Q1	Chinese Academy of Sciences

59	Rhamnolipid-enhanced mineralization of phenanthrene in organic-metal co-contaminated soils	Maslin y Maier	2000	Bioremediation Journal	Q1	Taylor and Francis
60	Bioremediation of heavy metals in food industry: Application of <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Massoud <i>et al.</i> ,	2019	Electronic Journal of Biotechnology	Q3	Elsevier
61	Extractants for the removal of mixed contaminants from soils	Maturi y Reddy	2008	Soil & sediment contamination	Q2	Taylor and Francis
62	Uptake of cadmium, lead nickel and zinc from soil and water solutions by the nickel hyperaccumulator <i>Berkheya coddii</i>	Mesjasz-Przybyłowicz <i>et al.</i>	2004	Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica	Q4	Polish Academy of Sciences, Biological Commission
63	Soil remediation and rehabilitation: treatment of contaminated and disturbed land (Vol. 23)	Meuser, H.	2012	Libro	---	Springer Science & Business Media
64	Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation	Mulligan	2001	Engineering geology	Q1	Elsevier
65	Effect of different organic ligands on cadmium sorption by and extractability from soils	Naidu y Harter	1998	Soil Science Society of America Journal	Q1	John Wiley & Sons Inc.
66	Effect of sludge amendment on remediation of metal contaminated soils	Navarro	2012	Minerals	Q3	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)
67	Toxic heavy metals: A bibliographic review of risk assessment, toxicity, and phytoremediation technology	Naveed <i>et al.</i>	2023	Q1	---	---
68	Performance evaluation of two-stage electrokinetic washing as soil remediation method for lead removal using different wash solutions	Ng <i>et al.</i>	2014	Electrochimica Acta	Q1	Elsevier
69	Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: a review	Ojuederie y Babalola	2017	International journal of environmental research and public health	Q2	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)
70	Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils	Ok <i>et al.</i>	2010	Environmental Earth Sciences	Q2	Springer Verlag
71	Cr (VI) sorption/desorption on untreated and mussel-shell-treated soil materials: fractionation and effects of pH and chromium concentration	Oteto <i>et al.</i>	2015	Solid Earth	Q1	Copernicus Gesellschaft mbH
72	The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain	Peralta-Videa <i>et al.</i>	2009	International Journal of Biochemistry and Cell Biology	Q1	Elsevier
73	Evaluation of selective uptake of selenium (Se (IV) and Se (VI)) and antimony (Sb (III) and Sb (V)) species by baker's yeast cells (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	Pérez-Corona <i>et al.</i>	1997	Analytica Chimica Acta	Q1	Elsevier
74	Phytoremediation: principles and perspectives	Barceló y Poschenriede	2003	Contributions to science	---	Institut d'Estudis Catalans

75	An overview of development in the soil-remediation technologies	Qian y Liu	2000	Chemical Industrial and Engineering Process	Q4	American Chemical Society
76	EDTA-assisted leaching of Pb and Cd from contaminated soil	Oiao et al.	2017	Chemosphere	Q1	Elsevier
77	Concept of aided phytostabilization of contaminated soils in postindustrial areas	Radziemska et al.	2018	International journal of environmental research and public health	Q2	Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)
78	A critical review of ferrate (VI)-based remediation of soil and groundwater	Rai et al.	2018	Environmental research	Q1	Academic Press Inc.
79	Endophytic bacteria and their potential to enhance heavy metal phytoextraction	Rajkumar et al.	2009	Chemosphere	Q1	Elsevier
80	Potential process implicated in bioremediation of textile effluents: a review	Ramachandran et al.	2013	Adv Appl Sci Res	---	---
81	Electrokinetic remediation	Ramalingam et al.	2013	Elxis sa Available at:< http://www. geoengineer. org/education/web-based-class-projects/geoenvironmental-remediation-technologies/electrokinetic-remediation	---	---
82	Assessment of heavy metal pollution and its impacts on soil physical, chemical properties and β -glucosidase activities in agricultural lands, Puducherry region	Ramamoorthy et al.	2015	Pol J Environ Stud	Q2	HARD
83	Phytoremediation: an environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation in developing countries	Erakhrumen y Agbontalor,	2007	Educational Research and Reviews	Q4	Academic Journals
84	Thermal-treated soil for mercury removal: Soil and phytotoxicity tests	Roh et al.	2000	American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America	Q1	John Wiley & Sons Inc.
85	Bioremediation of industrial effluents containing heavy metals using brewing cells of <i>Saccharomyces cerevisiae</i> as a green technology: a review	Soares y Soares	2012	Environmental Science and Pollution Research	Q1	Springer
86	Immobilisation of lead and zinc in contaminated soil using compost derived from industrial eggshell	Soares et al.	2015	Journal of environmental management	Q1	Academic Press Inc
87	Evaluation methods for assessing effectiveness of in situ remediation of soil and sediment contaminated with organic pollutants and heavy metals	Song et al.	2017	Environment international	Q1	Elsevier
88	Study on surfactants remediation in heavy metals contaminated soils	Sun et al.	2011	In 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (Vol. 3, pp. 1862-1865)	---	---

89	Microstructures and functional groups of <i>Nannochloropsis</i> sp. cells with arsenic adsorption and lipid accumulation	Sun et al.	2015	Bioresource Technology	Q1	Elsevier
90	Integrated Risk Information System-database	United States. Environmental Protection Agency	2007	US Environmental Protection Agency	---	---
91	Engineering bulletin: Soil washing treatment	US Environmental Protection Agency	1990	US Environmental Protection Agency	---	---
92	Carbon sequestration in reclaimed minesoils	Ussiri y Lal	2005	Critical Reviews in Plant Sciences	Q1	Taylor and Francis
93	Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field	Vangronsveld et al.	2009	Environmental Science and Pollution Research	Q1	Springer Science + Business Media
94	Pollution risk assessment and sources analysis of heavy metal in soil from bamboo shoots	Wang et al.	2022	International Journal of Environmental Research and Public Health	Q2	MDPI
95	A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China	Wei y Yang	2010	Microchemical journal	Q2	Elsevier
96	Removal of heavy metal from contaminated soil with chelating agents	Wei et al.	2011	Open Journal of Soil Science	---	---
97	Cosolvent effects on sorption and mobility of organic contaminants in soils	Wood et al.	1990	Chemosphere	Q1	Elsevier
98	Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation	Wuana y Okieimen	2011	International Scholarly Research Notices	---	---
99	Substrate utilization pattern, biomass and activity of microbial communities in a sequence of heavy metal-polluted paddy soils	Yao et al.	2003	Geoderma	Q1	Elsevier
100	Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals	Yao et al.	2012	Procedia Environmental Sciences	---	---
101	Remediation of soil co-contaminated with pyrene and cadmium by growing maize (<i>Zea mays</i> L.)	Zhang et al.	2009	International Journal of Environmental Science & Technology	Q2	CEERS
102	Electrokinetics in remediation of contaminated groundwater and soils	Zhang et al.	2001	Advances in Water Resources	Q1	Elsevier
103	Advances in remediation technologies of contaminated soils	Zhou et al.	2004	Ecology and Environmental Science	Q4	International Scientific Publications

Doi.

Artículo de investigación

Incidencia diferencial de muérdagos en plantas nativas e introducidas de áreas urbanas y periurbanas en el centro de Guerrero, México

Differential incidence of mistletoe in native and introduced plants in urban and peri-urban areas in central Guerrero, Mexico

Incidência diferencial de visco em plantas nativas e introduzidas em áreas urbanas e periurbanas no centro de Guerrero, México

Stephania G. Castellanos-Marin¹ ID. 0000-0001-7712-9281

Ernesto A. López-Huicochea² ID. 0000-0002-9874-7596

Edson A. Alvarez-Alvarez^{3*} ID. 0000-0002-3771-9946

¹Independiente. Prolongación Valle de los Pinos, Fraccionamiento Real del Valle, 39098, Petaquillas, Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, México.

²Departamento de Biología Evolutiva, Instituto de Ecología, A.C. (INECOL), Carretera antigua a Coatepec No. 351, El Haya, 91070, Xalapa, Veracruz, México.

³Laboratorio Integral de Fauna Silvestre, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas s/n, 39087, Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia alvarez.ea@outlook.com

Enviado: 03/02/2024

Revisado: 06/03/2024

Aprobado: 08/05/2024

Publicado: 15/06/2024

Resumen

Los muérdagos son una de las principales amenazas para la supervivencia de las plantas en áreas urbanas. En este estudio, se analizó la incidencia de muérdagos en plantas nativas e introducidas de tres áreas verdes (una urbana y dos periurbanas) en la región centro del estado de Guerrero, México. Se analizó la incidencia de muérdagos en plantas nativas e introducidas en las tres áreas verdes con una prueba de ji cuadrada (χ^2). Se comparó la incidencia de muérdagos entre el área urbana y las dos áreas periurbanas. Por último, se identificaron las especies de plantas hospederas (árboles y arbustos) de muérdagos como potenciales agentes de dispersión indirecta en la zona de estudio a través de métricas de centralidad de redes. Se registraron los muérdagos *Struthanthus orbicularis* y *Psittacanthus calyculatus*, los cuales parasitaron a 15 y tres especies de plantas en las áreas verdes, respectivamente. El área urbana tuvo el mayor número de individuos parasitados comparado con las dos periurbanas. Un área periurbana tuvo el mayor número de especies de plantas hospederas (12 especies). Las plantas introducidas presentaron mayor proporción de muérdagos en las áreas urbana y periurbanas. Las plantas introducidas como *Casuarina equisetifolia* y *Jacaranda*

mimosifolia son potenciales dispersores indirectos de los muérdagos, lo que resalta la importancia de reforestar áreas verdes urbanas con plantas nativas. El nivel de urbanización y el estatus de las plantas explicaron la presencia de muérdagos en las áreas verdes. *S. orbicularis* actúa como una especie parásita generalista y *P. calyculatus* como una especialista. Este estudio puede ser un insumo para diseñar estrategias de control y manejo de muérdagos para evitar pérdidas económicas y ecológicas en áreas verdes urbanas a nivel estatal y nacional.

Palabras clave: Infestación, Plantas parásitas, *Struthanthus*, *Psittacanthus*, Vegetación urbana.

Abstract

Mistletoes are a threat to the survival of plants in urban areas. In this study, the incidence of mistletoes in the native and alien plants of three green areas (one urban and two peri-urban) in the state of Guerrero, Mexico was analyzed. The incidence of mistletoes in native and alien plant species in the green areas was analyzed with a chi-square test (χ^2). The incidence of mistletoe among the urban area and the two peri-urban areas was also compared. Finally, the host plant species (tree and shrub) of mistletoes were identified as potential agents of indirect dispersal in the study area using network centrality metrics. Mistletoes species *Struthanthus orbicularis* and *Psittacanthus calyculatus* were recorded, which parasitized to 15 and three plant species in the green areas, respectively. Urban area had the highest number of parasitized individuals compared to the peri-urban ones. A peri-urban area had the highest number of host plant species (12 species). The alien plants had a higher proportion of mistletoes in urban and peri-urban areas. Alien plants such as *Casuarina equisetifolia* and *Jacaranda mimosifolia* are potential indirect dispersers of mistletoes, which highlights the importance of reforesting urban green areas with native plants. The urbanization level and the plant status explained the presence of mistletoes in urban green areas. *S. orbicularis* acts as a generalist parasite species and *P. calyculatus* as a specialist. This study can be used to design control and management strategies of mistletoes and to avoid economic and ecological losses in urban green areas at the state and national level.

Keywords: Infestation, Parasitic plants, *Struthanthus*, *Psittacanthus*, Urban vegetation.

Resumo

O visco é uma das principais ameaças à sobrevivência de plantas em áreas urbanas. Este estudo analisou a incidência de visco em plantas nativas e introduzidas em três áreas verdes (uma urbana e duas periurbanas) na região central do estado de Guerrero, México. A incidência de visco em plantas nativas e introduzidas nas três áreas verdes foi analisada utilizando o teste qui-quadrado (χ^2). A incidência de visco foi comparada entre a área urbana e as duas áreas periurbanas. Finalmente, as espécies de plantas hospedeiras (árvores e arbustos) do visco foram identificadas como potenciais agentes de dispersão indireta na área de estudo, utilizando métricas de centralidade de rede. Os viscos **Struthanthus orbicularis** e **Psittacanthus calyculatus** foram registrados, parasitando 15 e três espécies de plantas nas áreas verdes, respectivamente. A área urbana apresentou o maior número de indivíduos parasitados em comparação com as duas áreas periurbanas. Uma área periurbana apresentou o maior número de espécies de plantas hospedeiras (12 espécies). Plantas introduzidas apresentaram uma proporção maior de visco tanto em áreas urbanas quanto periurbanas. Plantas introduzidas como *Casuarina equisetifolia* e *Jacaranda mimosifolia* são potenciais dispersoras indiretas de visco, o que destaca a importância do reflorestamento de áreas verdes urbanas com plantas nativas. O nível de urbanização e o estado de conservação das plantas explicam a presença de visco nas áreas verdes. *Struthanthus orbicularis* atua como uma espécie parasita generalista, e *Psittacanthus calyculatus* como especialista. Este estudo pode subsidiar o desenvolvimento de estratégias de controle e manejo do visco para prevenir perdas econômicas e ecológicas em áreas verdes urbanas nos níveis estadual e nacional.

Palavras-chave: Infestação, Plantas parasitas, *Struthanthus*, *Psittacanthus*, Vegetação urbana.

Introducción

La familia Loranthaceae comprende aproximadamente 900 especies de plantas parásitas conocidas como muérdagos, distribuidas en ambientes naturales y antropogénicos (Geils y Vázquez-Collazo, 2002). La mayoría de las especies de muérdagos son generalistas (i.e., tienen un amplio rango de hospederos), pero algunos también muestran un comportamiento especializado a una sola especie, género o familia de hospedero (Arruda *et al.*, 2006; Ornelas, 2019). Los muérdagos, una vez depositados en la planta hospedera, dependen de su estructura morfológica

y calidad de los nutrientes (Watson, 2009; Pérez-Crespo *et al.*, 2016).

Los muérdagos son recursos importantes para varios grupos de animales. Por ejemplo, *Psittacanthus* spp. y *Struthanthus* spp. tienen flores y frutos muy atractivos para insectos y aves (Mourão *et al.*, 2016; Nunes-de-Almeida y Avalos, 2016; Ornelas, 2019). Los muérdagos también son elementos esenciales para los animales que consumen su néctar, frutos y dispersan sus semillas en áreas urbanas (Maruyama *et al.*, 2012; Shackleton, 2016). Así, los muérdagos mantienen la dinámica e integridad

de las comunidades vegetales a partir de interacciones mutualistas como la polinización y la dispersión de semillas (Rodríguez-Mendieta *et al.*, 2018; Mellado y Zamora, 2020).

En México, los muérdagos como *Cladocolea* spp., *Phoradendron* spp. y *Struthanthus* spp. son una de las principales amenazas para la vegetación urbana (Alvarado-Rosales y Saavedra-Romero, 2021). Estos muérdagos han afectado diferencialmente a la vegetación nativa e introducida. En general, se ha reportado que las plantas introducidas son las más abundantes y son las más susceptibles a los muérdagos en ambientes urbanos (Díaz-Limón *et al.*, 2016; Martínez-Castruita *et al.*, 2021; Hernández-Álvarez *et al.*, 2022). Esto se debe a que las especies exóticas suelen no estar adaptadas a los muérdagos locales o nativos (Shackleton, 2016; Pinheiro da Silva y Fadini, 2017).

El grado de urbanización también incrementa la incidencia de muérdagos en plantas nativas e introducidas. La urbanización altera las condiciones microclimáticas y los patrones naturales de distribución de la vegetación, originando mayor estrés fisiológico en las plantas y disminuyendo la disponibilidad de nutrientes (Czaja *et al.*, 2020; Lüttge y Buckeridge, 2020). Otros efectos negativos sobre los hospederos son el crecimiento lento del diámetro del tronco, altura, estrés hídrico, reducción de la floración y fructificación y, finalmente, la muerte del hospedero (Geils y Hawksworth, 2002; Mathiasen *et al.*, 2008). Esto resalta la necesidad de evaluar las afectaciones de los muérdagos para diseñar estrategias adecuadas de control y saneamiento de las áreas verdes urbanas (Alvarado-Rosales y Saavedra-Romero, 2021).

Otra manera de evaluar el efecto de los muérdagos sobre la comunidad de hospederos es a través del análisis de redes de interacciones. Se ha descrito que los ensamblajes de muérdagos y sus especies hospederas forman redes complejas de especies (Genini *et al.*, 2012). Con las redes de interacción muérdago-hospedero se ha evaluado la estructura ecológica de la comunidad, donde se han encontrado que algunas especies de muérdagos tienden a ser generalistas, mientras que otras llegan a mostrar preferencias por alguna especie de hospedero (Atencio *et al.*, 2021).

Asimismo, se han encontrado efectos potenciales directos e indirectos de la dispersión e incidencia de muérdagos en las comunidades vegetales (Blick *et al.*, 2012, 2013; Genini *et al.*, 2012).

En este estudio, se analizó la incidencia de las especies de muérdagos presentes en plantas nativas e introducidas de tres áreas verdes (una urbana y dos periurbanas) en el centro del estado de Guerrero, México. Bajo este escenario, se formularon las siguientes predicciones: 1) Se espera encontrar mayores niveles de incidencia de muérdagos en plantas de las áreas verdes urbanas debido a que en estas áreas existe mayor escasez de nutrientes, agua y alta compactación del suelo que hace a las plantas más susceptibles a ser parasitadas, comparado con las plantas de las áreas verdes periurbanas. 2) Se espera encontrar mayor incidencia de muérdagos en plantas introducidas porque estas suelen ser más susceptibles al parasitismo, debido a que no están adaptadas a los muérdagos locales o nativos en comparación con las plantas nativas. 3) Las especies introducidas, además de ser las más susceptibles a la infestación por muérdagos, serán también las más abundantes en las áreas verdes donde se encuentran. Por lo tanto, se espera encontrar mayor número de interacciones con estas especies, las cuales pueden reflejar el efecto potencial de la dispersión indirecta de muérdagos.

Finalmente, este estudio busca proporcionar información de las plantas nativas e introducidas parasitadas por muérdagos, el cual puede fungir como una herramienta base para futuros estudios sobre la ecología y distribución de la relación muérdago-hospedero en áreas urbanas y así poder desarrollar alternativas de control de muérdagos a nivel local, municipal y estatal, de ser requeridas.

Materiales y métodos

Sitios de estudio

El estudio se llevó a cabo de febrero a abril de 2021 en las localidades de Tixtla, Petaquillas y Chilpancingo de los Bravo, ubicadas en la zona centro del estado de Guerrero, México (17°29'15.50'' – 17°33'43.11'' N y 99°23'49.21'' – 99°30'19.40'' O; Figura 1).

Se seleccionaron tres áreas verdes infestadas por muérdagos (una urbana y dos periurbanas). El

área urbana es la Alameda “Granados Maldonado” ubicada en el centro de la ciudad de Chilpancingo de los Bravo ($17^{\circ}33'19.10''$ – $17^{\circ}33'24.62''$ N, $99^{\circ}30'12.59''$ – $99^{\circ}30'17.32''$ O; de aquí en adelante, Chilpancingo). La superficie del área es de 1.1 ha. El sitio presenta un clima cálido semicálido subhúmedo. La altitud promedio es de 1,200 msnm. Un área periurbana agrupa a las áreas verdes del interior de las instalaciones del Instituto Superior de Especialidades Pedagógicas (ISEP). El ISEP está ubicado en la periferia de la ciudad de Tixtla ($17^{\circ}33'23.08''$ – $17^{\circ}33'25.74''$ N, $99^{\circ}23'48.55''$ – $99^{\circ}23'54.50''$ O; de aquí en adelante, Tixtla). La superficie del ISEP es de 0.61 ha y está rodeado por una matriz de campos agrícolas. El sitio presenta un clima cálido semicálido subhúmedo. La altitud promedio es de 1,300 msnm. La segunda área periurbana agrupa a las áreas verdes del interior de las instalaciones de la Escuela Superior de Ciencias Naturales (ESCN). La ESCN está ubicada en la periferia de la localidad de Petaquillas, al sur de Chilpancingo de los Bravo ($17^{\circ}29'07.10''$ – $17^{\circ}29'11.87''$ N, $99^{\circ}27'52.12''$ – $99^{\circ}27'59.67''$ O; de aquí en adelante, Petaquillas). La superficie de la ESCN es de 2.72 ha. El clima es cálido subhúmedo. El tipo de vegetación en los alrededores corresponde a selva baja caducifolia asociada a cultivos agrícolas. La altitud promedio es de 1,150 msnm (García, 2004; INEGI, 2021).

Debido a que el área de estudio corresponde a un área verde urbana y a dos áreas periurbanas con un alto grado de modificación antropogénica y a que las especies de interés no presentan una distribución aleatoria, se optó por cuantificar uno a uno la totalidad de los individuos (Martínez-

Identificación de muérdagos y plantas hospederas

Debido a que el área de estudio corresponde a un área verde urbana y a dos áreas periurbanas con un alto grado de modificación antropogénica y a que las especies de interés no presentan una distribución aleatoria, se optó por cuantificar uno a uno la totalidad de los individuos (Martínez-

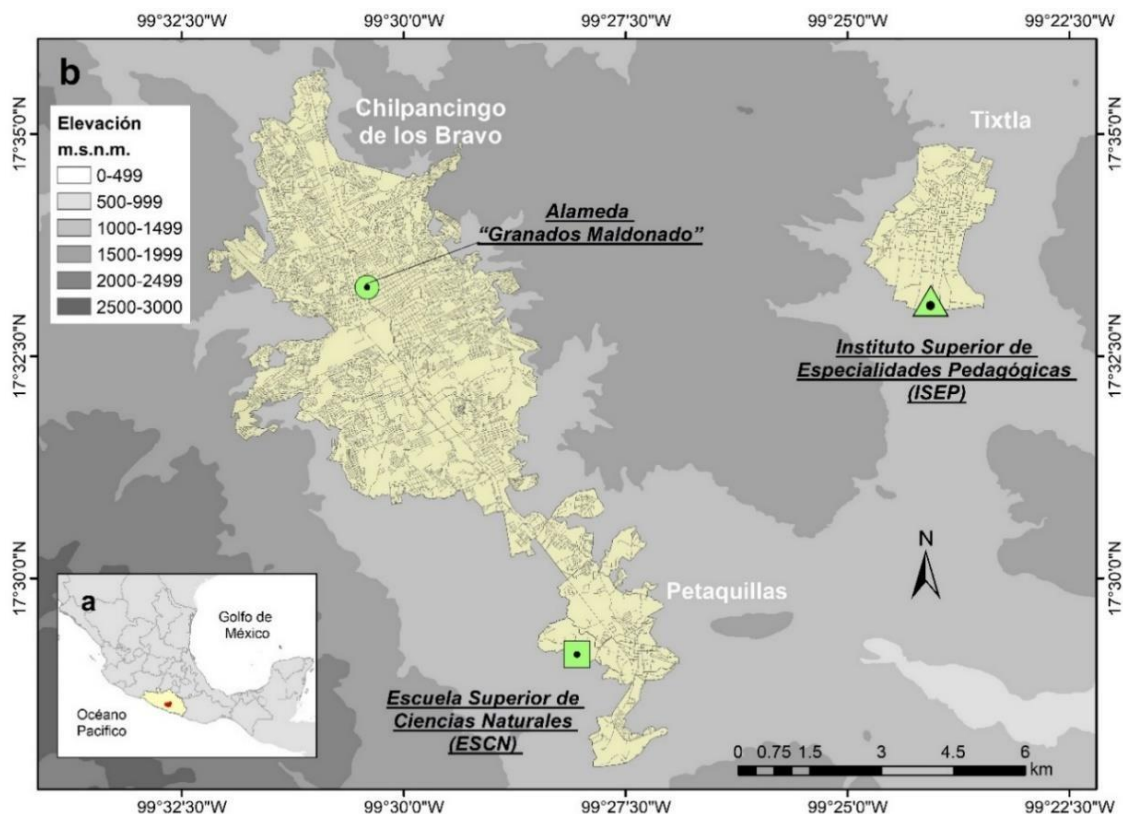


Figura 1. Ubicación geográfica del estado de Guerrero en el sur de México (a) y de las tres áreas verdes en la región centro de Guerrero (b). Se muestra el rango altitudinal del área de estudio.

Castruita *et al.*, 2021). Se identificaron las especies de muérdagos y las plantas hospederas (i.e., especies con presencia de muérdagos) en cada área verde urbana y periurbana. Cuando no se logró identificar a los muérdagos y hospederos *in situ*, se tomaron muestras botánicas (tres especímenes por especie) en floración o fructificación para su posterior identificación. Estos especímenes se depositaron en el herbario de la Facultad de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro). La nomenclatura taxonómica se verificó en la base de datos del Missouri Botanical Garden (W3Tropicos, 2023).

Análisis de datos

Se registró el número de especies de árboles y arbustos hospederos y no hospederos, y se contabilizó el número de individuos de cada especie de planta en las tres áreas verdes. Después, se analizó la incidencia de muérdagos en las especies de plantas arbóreas y arbustivas de cada área verde. Para ello, se contabilizó el número de individuos con muérdagos para cada especie de planta y se dividió entre el total de individuos de cada especie de planta en las tres áreas verdes para tener la proporción de plantas parasitadas y no parasitadas. Para analizar el efecto del parasitismo por los muérdagos en el estatus de origen/distribución de las plantas en las áreas verdes, cada especie de planta se clasificó en nativa (especie cuyo origen y distribución natural abarcan el territorio mexicano) o introducida (especie cuya presencia en México se debe a la intervención humana; Villaseñor, 2016).

Se llevó a cabo una comparación de las proporciones de plantas parasitadas y no parasitadas por muérdagos en las tres áreas verdes. Se construyó una tabla de contingencia para comparar la frecuencia observada de plantas parasitadas y no parasitadas en las tres áreas verdes con las frecuencias esperadas a través de una prueba de ji cuadrada (χ^2). La prueba de ji cuadrada analiza la asociación entre la proporción de dos variables de una tabla de contingencia (Weaver *et al.*, 2017). Asimismo, se construyó una segunda tabla de contingencia para analizar la preferencia de muérdagos por plantas nativas e introducidas entre las tres áreas verdes mediante

una prueba de independencia de G. Esta prueba se realizó en lugar de una ji cuadrada debido a que algunos valores esperados fueron menores de cinco. En ambas pruebas se interpretaron las desviaciones estadísticas de los valores esperados como indicativo de falta de preferencia (Mourão *et al.*, 2016).

Se construyeron curvas de rango/abundancia para comparar la estructura (dominancia/equidad) de las comunidades de plantas nativas e introducidas entre las áreas verdes. Este análisis muestra que las curvas pronunciadas indican baja uniformidad y alta dominancia de las plantas, y las curvas menos pronunciadas indican alta uniformidad y baja dominancia de las plantas (Magurran, 2004).

Para evaluar si las diferencias en el porcentaje de incidencia o proporción de hospederos parasitados por muérdagos dependían de las áreas verdes (urbana y periurbana) y del estatus de las especies hospederas (nativas o introducidas), se realizó un modelo lineal generalizado indicando como familia binomial a la distribución de errores de los residuales dada la naturaleza de nuestra variable de respuesta.

Finalmente, y debido a que en este trabajo no se consideró el papel de los dispersores de los muérdagos (e.g., aves), se construyeron redes de interacciones muérdago-hospedero, no para describir la estructura de la comunidad de interacciones, sino para determinar efectos potenciales indirectos en la dispersión de los muérdagos a través de las especies hospederas con mayor grado de centralidad (i.e., especies que por su posición o intermediación dentro de la red de interacciones facilitan la dispersión del muérdago en la región). Para este análisis se construyó una sola matriz de interacciones combinando los datos de las tres áreas verdes, la cual muestra la relación entre la frecuencia de ocurrencia del muérdago por cada especie hospedera (Atencio *et al.*, 2021). La importancia topológica de los nodos (especies) se cuantifica comúnmente utilizando índices de centralidad y, dado que diferentes índices de centralidad miden diferentes aspectos relacionados con la posición de un nodo dentro de su red (Martín-González *et al.*, 2010), se calcularon dos métricas: 1) la centralidad del vector propio o auto vector (EC)

que cuantifica qué tan influyente es un nodo (especie) respecto a la influencia de los demás nodos en la conexión de la red y, 2) la centralidad de cercanía (CC) que cuantifica el camino más corto promedio entre la especie focal y todas las demás especies de la red (Delmas *et al.*, 2019).

Se asumió que las especies o nodos con los valores más altos en cada índice reflejan la capacidad de estas para, de manera indirecta, dispersar los efectos de los muérdagos a través de la red (i.e., capacidad potencial de los muérdagos de colonizar más hospederos). La red de interacciones muérdago-hospedero se realizó con la librería *circulize* (Gu, 2014). Las métricas de centralidad se calcularon con las librerías *bipartite* (Dormann *et al.*, 2022) e *igraph* (Csardi y Nepusz, 2006). Los análisis estadísticos se consideraron significativos cuando $p \leq 0.05$. Todos los análisis se realizaron en R 4.1.0 (R Development Core Team, 2021).

Resultados

Composición de especies de árboles, arbustos y muérdagos

Se registró un total de 370 individuos de árboles y arbustos pertenecientes a 41 especies clasificadas dentro de 23 familias. De estas, 113 individuos corresponden a 17 especies que fueron parasitadas por *Struthanthus orbicularis* y *Psittacanthus calyculatus* en el área de estudio. De las especies parasitadas, nueve especies de plantas hospederas se identificaron como introducidas y ocho como nativas (Tabla S1).

En el área urbana (Chilpancingo) se registró un total de 210 individuos, de los cuales 54 estuvieron parasitados. En las áreas periurbanas (Tixtla + Petaquillas) se registró un total de 160 individuos, de los cuales 59 estuvieron parasitados (Figura 2A). Dentro de estas áreas periurbanas, Petaquillas contó con 70 individuos sanos y 46 individuos parasitados, y Tixtla tuvo 31 individuos sanos y 13 individuos parasitados (Figura 2A; Tabla S1). Del total de plantas parasitadas ($n = 113$), 92 individuos pertenecieron a especies introducidas y 11 individuos fueron de especies nativas (Figura 2B; Tabla S1).

Las especies de árboles y arbustos introducidos fueron las más abundantes en el área de estudio

(menos en Tixtla), siendo *Ficus benjamina*, *Jacaranda mimosifolia* y *Casuarina equisetifolia* las más abundantes (Tabla S1; Figura 3).

Incidencia de muérdagos en áreas verdes y en el estatus de las especies hospederas

Se encontró que la cantidad de plantas con incidencia de muérdagos en comparación con las plantas no parasitadas fue menor en Tixtla y Chilpancingo, con excepción de Petaquillas donde la cantidad de plantas parasitadas supera a las plantas no parasitadas (Figura 2; $\chi^2 = 7$, $gl = 2$, $p = 0.03$). Del total de individuos parasitados ($n = 113$), los muérdagos tuvieron mayor preferencia por las especies de plantas introducidas que por las nativas, con excepción de Tixtla donde las especies de plantas nativas fueron las que presentaron mayor incidencia de muérdagos ($G = 32$, $gl = 2$, $p < 0.001$).

Los factores sitio (urbano-periurbano) y estatus (especies nativas-especies introducidas) tuvieron un efecto significativo en la proporción de plantas parasitadas por muérdagos ($\chi^2 = 28.62$, $gl = 59$, $p < 0.001$; Figura 4).

Interacción entre especies de muérdagos y sus hospederos

Struthanthus orbicularis parasitó a un total de 15 especies de plantas, y *Psittacanthus calyculatus* a tres especies (Figura 5). Ambos muérdagos parasitaron a *Psidium guajava* en Tixtla y Petaquillas. *S. orbicularis* fue tan frecuente como las especies más abundantes de cada sitio y parasitó a más especies de plantas (12 especies) en Petaquillas comparado con Chilpancingo y con Tixtla (cuatro y dos especies, respectivamente). En Tixtla, *P. calyculatus* parasitó a tres especies de plantas, dos especies nativas y solo una introducida (Figura S1).

Las especies de plantas introducidas con los valores más altos de centralidad fueron *Casuarina equisetifolia* ($EC = 0.752$ y $CC = 0.224$) y *Jacaranda mimosifolia* ($EC = 0.617$ y $CC = 0.197$; Tabla 1), las cuales también fueron dos de las especies hospederas más abundantes en las áreas verdes del área de estudio (Figura 5).

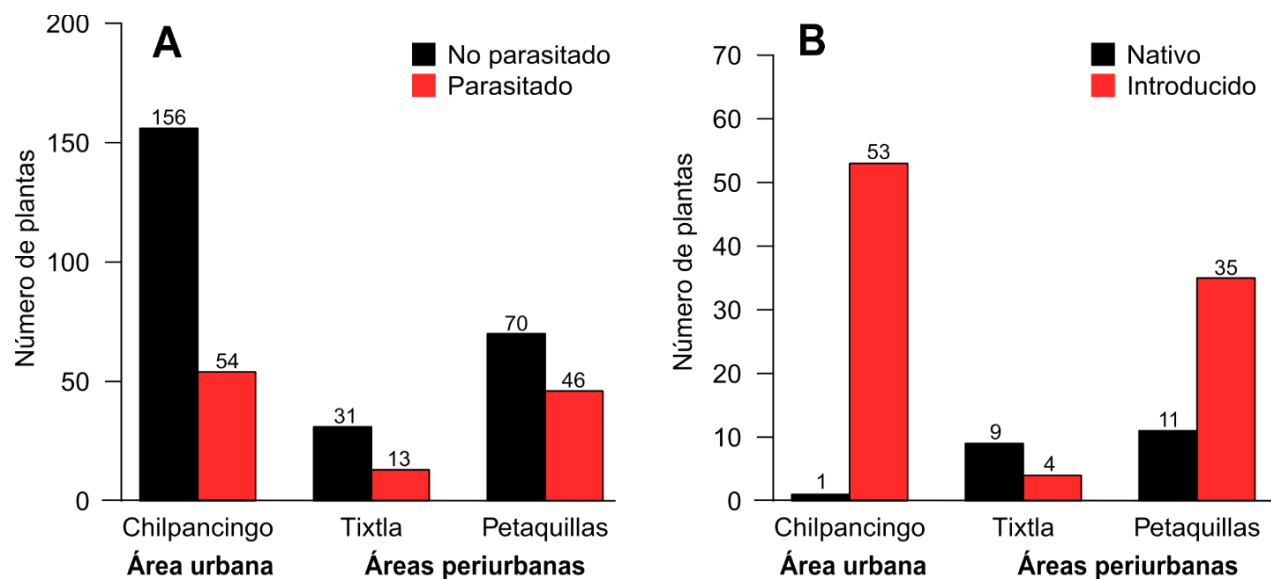


Figura 2. Abundancia de plantas encontradas en las tres áreas verdes de la región centro del estado de Guerrero, México. A) Cantidad de plantas parasitadas ($n = 113$) y no parasitadas ($n = 257$), y B) cantidad de plantas nativas o introducidas parasitadas por muérdagos.

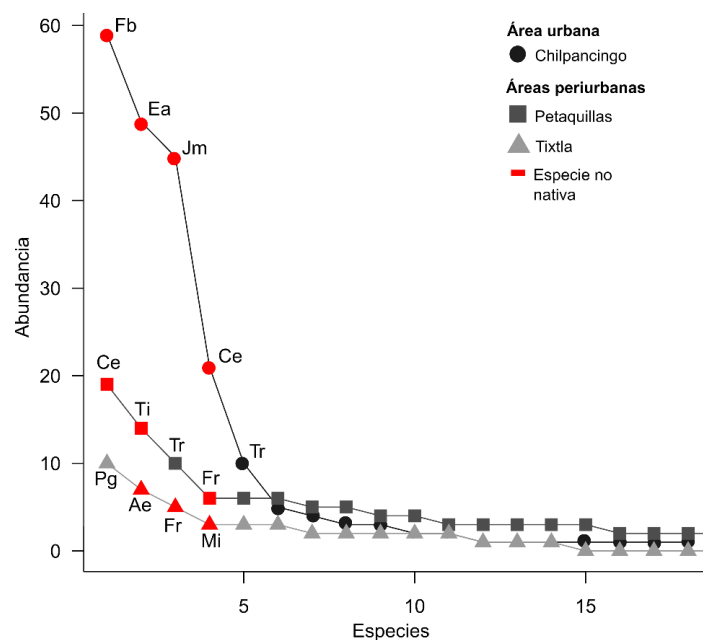


Figura 3. Curvas de rango-abundancia de las plantas nativas e introducidas en las tres áreas verdes de la región centro del estado de Guerrero, México. En rojo se indican a las especies introducidas más abundantes. Los códigos de las especies de plantas hospedaderas se muestran en la tabla S1.

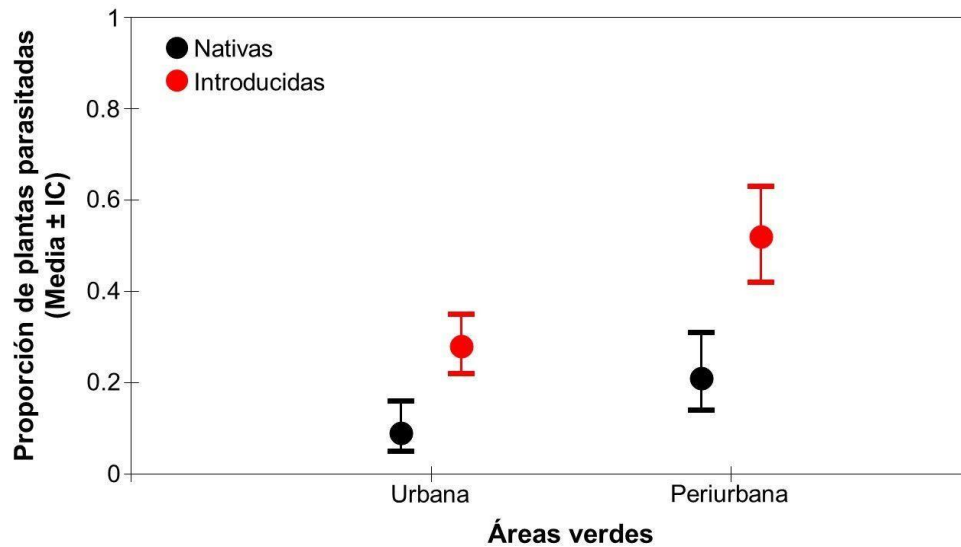


Figura 4. Proporción de plantas nativas e introducidas parasitadas entre áreas verdes en la región centro del estado de Guerrero, México.

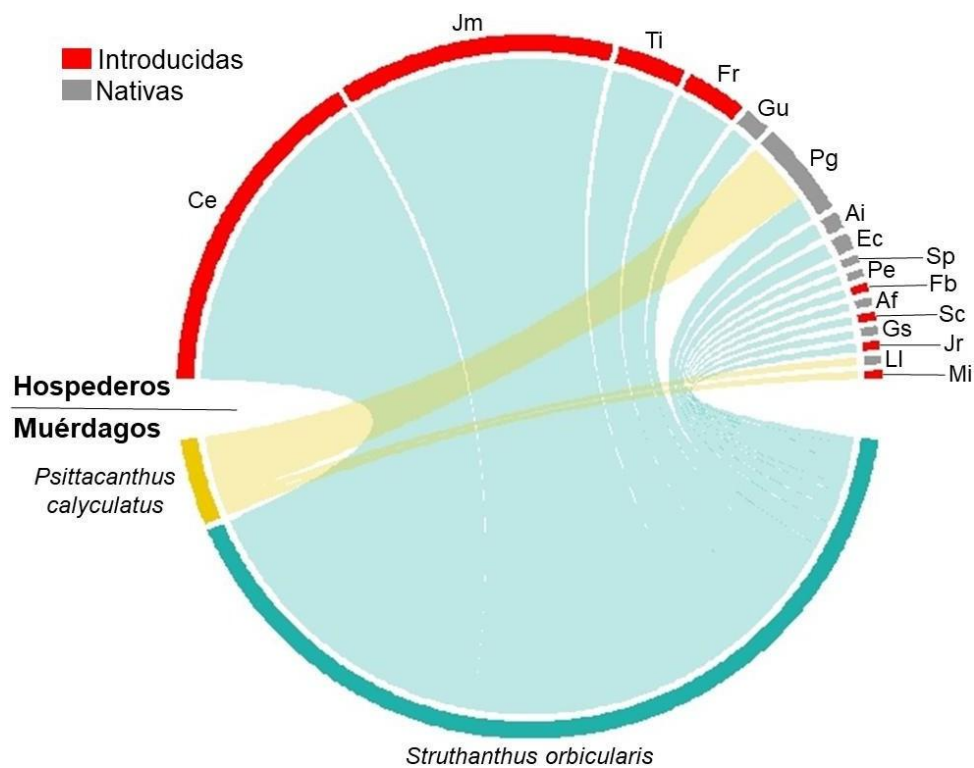


Figura 5. Interacción entre las dos especies de muérdagos y sus hospederos en las tres áreas verdes en la región centro del estado de Guerrero, México. El grosor de las líneas indica el número total de individuos parasitados. Los códigos de las especies de plantas hospederas se muestran en la tabla S1.

Tabla 1. Valores de centralidad calculados para cada una de las especies de árboles y arbustos que conforman la red de interacciones muérdago-hospedero en las tres áreas verdes en la región centro del estado de Guerrero, México. *Estatus* = nativas (N), introducidas (I). *Métricas de centralidad*: centralidad del autovector (EC), centralidad de cercanía (CC).

Especie hospedera	Estatus	EC	CC	Número de individuos parasitados
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	N	0.019	0.009	1
<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	I	0.039	0.018	2
<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	I	0.752	0.224	39
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	N	0.039	0.018	2
<i>Ficus benjamina</i> L.	I	0.019	0.009	1
<i>Ficus retusa</i> L.	I	0.135	0.058	7
<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.	N	0.019	0.009	1
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	N	0.058	0.026	3
<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	I	0.617	0.197	32
<i>Juglans regia</i> L.	I	0.019	0.009	1
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam) De Wit	N	0	0.007	1
<i>Mangifera indica</i> L.	I	0	0.007	1
<i>Pseudobombax ellipticum</i> (Kunth) Dugand	N	0.019	0.009	1
<i>Psidium guajava</i> L.	N	0.059	0.030	11
<i>Spathodea campanulata</i> P. Beauv.	I	0.019	0.009	1
<i>Spondias purpurea</i> L.	N	0.019	0.009	1
<i>Tamarindus indica</i> L.	I	0.154	0.066	8

Discusión

Incidencia de muérdagos en áreas verdes

Se encontró mayor incidencia de muérdagos en el área urbana comparado individualmente con las periurbanas. Este resultado confirma la primera hipótesis sobre mayor incidencia de muérdagos en áreas verdes con mayor grado de urbanización

dada la disponibilidad de hospederos. Particularmente, la mayor incidencia de muérdagos en el área urbana (Chilpancingo) respecto de las periurbanas (Tixtla y Petaquillas) puede ser explicado por las condiciones de manejo que presentan las áreas verdes. Por ejemplo, el área verde urbana está situada en el centro de Chilpancingo, una zona con alto grado

de perturbación en la ciudad (*e.g.*, mayor número personas, edificaciones, tráfico vehicular y compactación del suelo). En particular, áreas más urbanizadas alteran las condiciones microclimáticas de las áreas verdes, creando islas de calor que originan mayor estrés fisiológico, así como disminuciones en la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Czaja *et al.*, 2020; Lüttge y Buckeridge, 2020). Esto hace que la vegetación sea más vulnerable a plagas y enfermedades (Desprez-Loustau *et al.*, 2006; Cibrián y Cibrián, 2007), incrementando la incidencia de muérdagos en el área verde urbana. Esto sugiere que es necesario controlar el nivel de infestación de los muérdagos para evitar pérdidas económicas y biológicas de las áreas verdes.

Otro factor que pudo contribuir a una mayor incidencia de muérdagos (particularmente *Struthanthus orbicularis*) en el área verde urbana, es que dos especies de plantas introducidas (*Casuarina equisetifolia* y *Jacaranda mimosifolia*) fueron más abundantes en este sitio en relación con las periurbanas. El número de individuos parasitados en *C. equisetifolia* (20 individuos parasitados = 95%) y *J. mimosifolia* (32 individuos parasitados = 71%) fue mayor comparado a los individuos no parasitados de ambas especies de plantas. Este resultado coincide con estudios previos que han documentado que *Struthanthus* spp. parasita a varias especies vegetales (Geils y Vázquez-Collazo, 2002; Alvarado-Rosales y Saavedra-Romero, 2021).

El mayor número de plantas parasitadas en Chilpancingo también está relacionado con la presencia de algunas especies de aves. Algunas aves nectarívoras (*Cynanthus doubledayi*) y frugívoras (*Chlorophonia elegantissima* y *Ptiliogonys cinereus*) se observaron alimentarse de los frutos y néctar de *Struthanthus orbicularis* en el área verde urbana (Alvarez-Alvarez *com. pers.*). Aunque hasta la fecha no hay registros de frugivoría y nectarivoría en *S. orbicularis*, se ha documentado que otros muérdagos como *S. concinnus* y *Psittacanthus* spp. mantienen relaciones mutualistas con distintos grupos de animales, incluido las aves (Ramírez y Ornelas, 2009, 2010; Nunes-de-Almeida y Avalos, 2016). Por lo tanto, es probable que las semillas de *S.*

orbicularis pudieron ser dispersadas por estas especies de aves en distintos árboles, como *C. equisetifolia* y *J. mimosifolia*, incrementando la incidencia de muérdagos en el área verde urbana. Esto es importante, pues la dispersión de los muérdagos es un tema que debe estudiarse dentro del área de estudio, particularmente el papel de las aves frugívoras en la ocurrencia de muérdagos en ambientes urbanos.

Incidencia de muérdagos en plantas nativas e introducidas

Los resultados mostraron que hubo mayor incidencia de muérdagos en plantas introducidas comparadas con las nativas, lo que coincide con la segunda hipótesis sobre mayor parasitismo en plantas introducidas. Este resultado coincide con estudios previos que han reportado que las plantas introducidas presentan mayor parasitismo, debido a que suelen tener más susceptibilidad al no estar adaptadas a los muérdagos locales o nativos (Maruyama *et al.*, 2012; Díaz-Limón *et al.*, 2016; Shackleton, 2016; Pinheiro da Silva y Fadini, 2017). Una razón de esto es que las plantas introducidas tienen tasas más altas de reproducción que mejora su éxito invasivo en ambientes naturales y antropogénicos (Ni *et al.*, 2021). Esta rápida colonización en nuevos ambientes puede incrementar la incidencia de *S. orbicularis* y *P. calyculatus* en plantas introducidas de las áreas verdes. De hecho, *C. equisetifolia* y *J. mimosifolia* son especies introducidas altamente susceptibles a muérdagos (Hishe y Abraha, 2013; Těšitel *et al.*, 2020; Hernández-Álvarez *et al.*, 2022), de las cuales *C. equisetifolia* es susceptible porque dentro de su rango de distribución natural ya es altamente parasitada por muérdagos (Barlow y Wiens, 1977).

Otro factor que también explica la mayor incidencia de muérdagos en plantas introducidas, es que como se mencionó anteriormente, en el área verde urbana (Chilpancingo) hay mayor número de especies introducidas comparado con las nativas. Se ha reportado que los muérdagos suelen parasitar a las especies de hospederos más abundantes debido a un artefacto de su propio número. Es decir, una especie abundante tiene

mayor probabilidad de ser parasitada al encontrarse más frecuentemente con el parásito (Mourão *et al.*, 2016; Okubamichael *et al.*, 2016). Asimismo, se ha documentado que los muérdagos amplían su rango de hospederos nativos a introducidos (Mellado y Zamora, 2020). Incluso, este último grupo de plantas pueden volverse sus hospederos principales con tal de persistir en ambientes perturbados o urbanizados (Gairola *et al.*, 2013; Fontúrbel *et al.*, 2020). En las últimas décadas, se han llevado a cabo programas de reforestación para combatir la pérdida forestal en México (Sarukhán *et al.*, 2010). Sin embargo, la falta de información biológica y ecológica sobre especies nativas ha llevado al uso de especies introducidas como *Eucalyptus* spp., *Casuarina* spp. y *Jacaranda* spp., a pesar de que muchas plantas nativas son potencialmente adecuadas para fines de reforestación en el país (Téllez *et al.*, 2020). Esto resalta la importancia de reforestar áreas verdes urbanas con plantas nativas, porque las especies introducidas tienden a incrementar la incidencia de muérdagos en las áreas verdes urbanas y periurbanas.

Interacción entre muérdagos y sus hospederos

Los muérdagos tuvieron mayor número de interacciones con las plantas introducidas, resultado que confirma la tercera hipótesis. Particularmente, las redes de interacción muérdago-hospedero mostraron que *S. orbicularis* actúa como una especie parásita generalista y *P. calyculatus* como una especialista. Las redes de interacciones muérdago-hospedero han permitido describir la asimetría de la asociación, donde pocas especies de muérdagos interactúan con muchas especies de hospederos, indicando baja especificidad de infección. En cambio, hay especies de hospederos que son altamente susceptibles a una infestación por una especie particular de muérdago. Por ejemplo, algunos muérdagos como *Cladocolea* spp. y *Struthanthus* spp. son poco específicas por su hospedero (Genini *et al.*, 2012; Mourão *et al.*, 2016). Mientras que *Psittacanthus* spp., si bien pueden también establecer asociaciones generalistas con sus hospederos, estas suelen ser más específicas sobre las especies de hospedero

que parasitan (Genini *et al.*, 2012; Pérez-Crespo *et al.*, 2016; Hernández-Álvarez *et al.*, 2022). Esto indica que *P. calyculatus* y *S. orbicularis* pueden ampliar su preferencia a nuevos hospederos en los sitios de estudio, como ha sido observado con otras especies de muérdagos en ambientes urbanos (Maruyama *et al.*, 2012; Pinheiro da Silva y Fadini, 2017; Alvarado-Rosales y Saavedra-Romero, 2021).

Las medidas de centralidad empleadas en el análisis de la red permitieron identificar a las especies que son focos potenciales de propagación de muérdagos al resto de especies en los sitios de estudio. Además, este análisis permitió integrar de manera indirecta el factor dispersión, el cual está ligado a la disponibilidad de recursos en la comunidad (Blick *et al.*, 2012). De acuerdo con las redes de interacción, que los muérdagos prácticamente no compartan hospederos es consistente con la hipótesis de que, por competencia, los muérdagos forman patrones de especificidad locales, aunque su abanico de hospederos sea mayor a escalas más grandes (Blick *et al.*, 2012, 2013).

Conclusiones

Este estudio mostró que *S. orbicularis* actúa como una especie parásita generalista y *P. calyculatus* como una especialista. Se reportó a *Psidium guajava* como una especie hospedera de ambas especies de muérdagos. Las plantas introducidas son potenciales dispersores indirectos de los muérdagos, lo que resalta la importancia de reforestar áreas verdes urbanas con plantas nativas. Las podas sanitarias de las especies introducidas como *C. equisetifolia* y *J. mimosifolia* puede ayudar a disminuir focos de infección indirecta para otras especies de árboles. Es recomendable que se desarrollen estudios con un mayor esfuerzo de investigación, donde involucren otros factores como variables estructurales de la vegetación, variables ambientales, variables de parasitismo (*e.g.*, intensidad y severidad) y mayor tamaño de muestra. Este trabajo puede servir como base para futuros estudios ecológicos (*e.g.*, polinización, dispersión de semillas) en muérdagos en asentamientos humanos, así como para

desarrollar alternativas de su control y manejo en áreas verdes a nivel municipal, estatal y nacional.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias Químico-Biológicas por su apoyo para la realización de este estudio. A Bernardina Ortega por su ayuda en el trabajo de campo. A los revisores anónimos por sus recomendaciones para mejorar este trabajo.

Referencias

- Alvarado-Rosales, D., Saavedra-Romero, L.L. (2021). Tree damage and mistletoe impact on urban green areas. *Revista Árvore*, 45, e4530.
- Arruda, R., Carvalho, L.N., Del-Claro, K. (2006). Host specificity of a Brazilian mistletoe, *Struthanthus aff. polyanthus* (Loranthaceae), in cerrado tropical savanna. *Flora*, 201, 127-134.
- Atencio, N.O., Vidal-Russell, R., Chacoff, N., Amico, G.C. (2021). Host range dynamics at different scales: host use by a hemiparasite across its geographic distribution. *Plant Biology*, 23, 612-620.
- Barlow, B.A., Wiens, D. (1977). Host-parasite resemblance in Australian mistletoes: the case for cryptic mimicry. *Evolution*, 31, 69-84.
- Blick, R.A.J., Burns, K.C., Moles, A.T. (2012). Predicting network topology of mistletoe-host interactions: Do mistletoes really mimic their hosts? *Oikos*, 121, 761-771.
- Blick, R.A.J., Burns, K.C., Moles, A.T. (2013). Dominant network interactions are not correlated with resource availability: A case study using mistletoe-host interactions. *Oikos*, 122, 889-895.
- Cibrián, D., Cibrián, J. (2007). Escenarios forestales y enfermedades. In D. Cibrián, D. Alvarado, S. García (Eds), *Enfermedades Forestales en México*. Chapingo, Mex: Universidad Autónoma de Chapingo, 4-9.
- Csardi, G., Nepusz, T. (2006). The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex System*, 1695, 1-9. <https://igraph.org>
- Czaja, M., Kołton, A., Muras, P. (2020). The complex issue of urban trees-stress factor accumulation and ecological service possibilities. *Forests*, 11, 932.
- Delmas, E., Besson, M., Brice, M.-H., Burkle, L.A., Dalla Riva, G.V., Fortin, M.-J., Gravel, D., Guimarães Jr., P.R., Hembry, D.H., Newman, E.A., Olesen, J.M., Pires, M.M., Yeakel, J.D., Poisot, T. (2019). Analysing ecological networks of species interactions. *Biological Reviews*, 94, 16-36.
- Desprez-Loustau, M.L., Marcais, B., Nageleisen, L.M., Piou, D., Vannini, A. (2006). Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Annals of Forest Science*, 63, 597-612.
- Díaz-Limón, M.P., Cano-Santana, Z., Queijeiro-Bolaños, M.E. (2016). Mistletoe infection in an urban forest in Mexico City. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17, 126-134.
- Dormann, C.F., Fruend, J., Gruber, B., Beckett, S., Devoto, M., Felix, G.M.F., Iriondo, M., Opsahl, T., Pinheiro, R.B.P., Strauss, R. (2022). Visualising bipartite networks and calculating some (ecological) indices. Version 2.18. <https://github.com/biometry/bipartite>
- Fontúrbel, F.E. (2020). Mistletoes in a changing world: a premonition of a non-analog future? *Botany*, 98, 479-488.
- Gairola, S., Bhatt, A., Govender, Y., Baijnath, H., Procheş, Ş., Ramdhani, S. (2013). Incidence and intensity of tree infestation by the mistletoe *Erianthemum dregei* (Eckl. & Zeyh.) V. Tieghem in Durban, South Africa. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12, 315-322.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México, DF: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- Geils, B.W., Hawksworth, F.G. (2002). Damage, effects, and importance of dwarf mistletoes. In: B.W. Geils, T.J. Cibrián, B. Moody (Eds), *Ogden, USA: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station*, 57-65.
- Geils, B.W., Vázquez-Collazo, I. (2002). Loranthaceae and Viscaceae in North America. In: B.W. Geils, T.J. Cibrián, B. Moody (Eds), *Mistletoes of North American conifers*. Ogden, USA: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1-8.

- Genini, J., Côrtes, M.C., Guimarães, P.R., Galetti, M. (2012). Mistletoes play different roles in a modular host-parasite network. *Biotropica*, 44, 171-178.
- Gu, Z., Gu, L., Eils, R., Schlesner, M., Brors, B. (2014). Circlize implements and enhances circular visualization in R. *Bioinformatics*, 30, 2811-2812.
- Hernández-Álvarez, E., Gallegos-Rodríguez, A., Guzmán-Paredes, C.M., Rodríguez-Ramírez, C.G., Hernández-Tovar, M.A. (2022). Diagnóstico ecológico y fitosanitario de un parque urbano del área metropolitana de Guadalajara, México. *eCUCBA*, 9, 114-122.
- Hishe, M., Abraha, B. (2013). Mistletoe infection of woody plant species at Bahir Dar University main campus, Bahir Dar, Ethiopia. *Ethiopian Journal of Science* 36, 119-124.
- INEGI (2021). Página electrónica institucional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. www.inegi.org.mx
- Lüttge, U., Buckeridge, M. (2020). Trees: structure and function and the challenges of urbanization. *Trees*, 37, 9-16.
- Magurran, A.E. (2004). *Measuring biological diversity*. Oxford: Blackwell Publishing. <https://archive.org/details/measuringbiology0000magu/page/n5/mode/2up>
- Martínez-Castruita, I.A., Sandoval-Ortega, M.H., Arellano-Delgado, M., Martínez-Calderón, V.M. (2021). Infestación por *Cladocolea loniceroides* y sus potenciales aves dispersoras de semillas en un área verde urbana de la ciudad de Aguascalientes, México. *Madera y Bosques*, 27, e2712084.
- Martín-González, A.M., Dalsgaard, B., Olesen, J.M. (2010). Centrality measures and the importance of generalist species in pollination networks. *Ecological Complexity*, 7, 36-43.
- Maruyama, P.K., Mendes-Rodrigues, C., Alves-Silva, E., Cunha, A.F. (2012). Parasites in the neighborhood: interactions of the mistletoe *Phoradendron affine* (Viscaceae) with its dispersers and hosts in urban areas of Brazil. *Flora*, 207, 768-773.
- Mathiasen, R.L., Nickrent, D.L., Shaw, D.C., Watson, D.M. (2008). Mistletoes: pathology, systematics, ecology, and management. *Plant Disease*, 98, 988-1006.
- Mellado, A., Zamora, R. (2020). Ecological consequences of parasite host shifts under changing environments: more than a change of partner. *Journal of Ecology*, 108, 788-796.
- Mourão, F.A., Pinheiro, R.B.P., Jacobi, C.M., Figueira, J.E.C. (2016). Host preference of the hemiparasite *Struthanthus flexicaulis* (Loranthaceae) in ironstone outcrop plant communities, southeast Brazil. *Acta Botanica Brasilica*, 30, 41-46.
- Ni, M., Deane, D.C., Li, S., Wu, Y., Sui, X., Xu, H., Chu, C., H, F., Fang, S. (2021). Invasion success and impacts depend on different characteristics in non-native plants. *Diversity and Distributions*, 27, 1194-1207.
- Nunes-de-Almeida, C.H.L., Avalos, V.R. (2016). Foraging techniques of Swallow-tailed Cotinga (*Phibalura flavirostris*) on fruits of *Struthanthus marginatus* (Loranthaceae) in Monte Verde, Camanducaia, state of Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Ornitologia*, 24, 27-29.
- Okubamichael, D.Y., Griffiths, M.E., Ward, D. (2016). Host specificity in parasitic plants- perspectives from mistletoes. *AoB PLANTS*, 8, plw069.
- Ornelas, J.F. (2019). Los muérdagos *Psittacanthus* en México: ecología, evolución, manejo y conservación. *Biodiversitas*, 146, 12-16.
- Pérez-Crespo, M.J., Lara, C., Ornelas, J.F. (2016). Uncorrelated mistletoe infection patterns and mating success with local host specialization in *Psittacanthus calyculatus* (Loranthaceae). *Evolutionary Ecology*, 30, 1061-1080.
- Pinheiro da Silva, F., Fadini, R.F. (2017). Observational and experimental evaluation of hemiparasite resistance in trees in the urban afforestation of Santarém, Pará, Brazil. *Acta Amazonica*, 47, 311-320.
- Ramírez, M.M., Ornelas, J.F. (2009). Germination of *Psittacanthus schiedeanus* (mistletoe) seeds after passage through the gut of Cedar Waxwings and Grey Silky-flycatchers. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 136, 322-331.
- Ramírez, M.M., Ornelas, J.F. (2010). Pollination and nectar production of *Psittacanthus*

- schiedeanus* (Loranthaceae) in central Veracruz, Mexico. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 87, 61-67.
- R Development Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. Version 4.1.0. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
<http://www.R-project.org>
- Rodríguez-Mendieta, S., Lara, C., Ornelas, J.F. (2018). Unravelling host-mediated effects on hemiparasitic Mexican mistletoe *Psittacanthus calyculatus* (DC.) G. Don traits linked to mutualisms with pollinators and seed dispersers. *Journal of Plant Ecology*, 11, 827-842.
- Sarukhán, J., Carabias, J., Koleff, P., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J., Halffter, G., González, R., March, I., Mohar, A., Anta, S., De la Maza, J. (2010). Capital natural de México: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. México, DF: CONABIO.
<https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/capitalNatMex>
- Shackleton, C. (2016). Do indigenous street trees promote more biodiversity than alien ones? Evidence using mistletoes and birds in South Africa. *Forests*, 7, 134.
- Téllez, O., Mattana, E., Diazgranados, M., Kühn, N., Castillo-Lorenzo, E., Lira, R., Montes-Leyva, L., Rodríguez, I., Ortiz, C.M.F., Way, M., Dávila, P., Ulian, T. (2020). Native trees of Mexico: diversity, distribution, uses and conservation. *PeerJ*, 87, e9898.
- Těšitel, J., Cirocco, R.M., Facelli, J.M., Watling, J.R. (2020). Native parasitic plants: Biological control for plant invasions? *Applied Vegetation Science*, 32, 464-469.
- Villaseñor, J.L. (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87, 559-902.
- Watson, D.M. (2009). Determinants of parasitic plant distribution: the role of host quality. *Botany*, 87, 16–21.
- Weaver, K.F., Morales, V., Dunn, S.L., Godde, K., Weaver, P.F. (2017). An introduction to statistical analysis in research: with applications in the biological and life sciences. Nueva Jersey, USA: John Wiley & Sons, 594p.
- W3Tropicos. (2023). Missouri Botanical Garden's VAST nomenclatural database and associated authority files. Tropicos v3.4.1. Missouri Botanical Garden, Saint Louis, Missouri.
www.tropicos.org

Doi.

Artículo de investigación

**Aproximación metodológica a la comprensión de problemas
matemáticos**

**Methodological approach to understanding mathematical
problems**

**Abordagem metodológica para a compreensão de problemas
matemáticos**

Ricardo Abreu-Blaya¹ ID. 0000-0002-4656-5168

Abel Cabrera-Martínez² ID. 0000-0003-2806-4842

Juan Carlos Hernández-Gómez³ ID. 0009-0008-5155-4050

José Luis Sánchez-Santiesteban^{3*} ID. 0000-0002-3557-8967

¹Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma Guerrero. Ciudad Universitaria, Av. Lázaro Cárdenas S/N, 39087, Chilpancingo, Guerrero, México.

²Departamento de Matemáticas, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Albert Einstein (C2) 3ª Planta, 14071, Córdoba, España.

³Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma Guerrero. Carlos E. Adame 5, Col. La Garita, Acapulco, 39750, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia josesantiesteban@uagro.mx

Enviado: 03/02/2024

Revisado: 06/03/2024

Aprobado: 08/05/2024

Publicado: 15/06/2024

Resumen

La resolución de problemas matemáticos es una actividad central en el proceso de enseñanza aprendizaje de la Matemática. Muchos investigadores en el área de la Matemática Educativa que reportan dificultades en la fase de comprensión del problema. Este artículo aborda dicha fase y brinda una propuesta de acciones metodológicas con el objetivo de guiar a estudiantes y docentes durante la fase de comprensión del problema.

Palabras clave: comprensión, propuesta, metodológica, problema, matemáticas.

Abstract

Mathematical problem solving is a central activity in the process of teaching and learning mathematics. Many researchers in the area of Educational Mathematics report difficulties in the comprehension phase of the problem. This article addresses this phase and offers a

proposal of methodological actions with the aim of guiding students and teachers during this process.

Keywords: understanding, methodological, proposal, problem, mathematics.

Resumo

A resolução de problemas matemáticos é uma atividade central no processo de ensino e aprendizagem da matemática. Muitos pesquisadores na área da educação matemática relatam dificuldades na fase de compreensão dos problemas. Este artigo aborda essa fase e propõe ações metodológicas para orientar alunos e professores durante essa etapa.

Palavras-chave: compreensão, proposta, metodológica, problema, matemática.

Introducción

La resolución de problema matemático (RPM) en la escuela es una actividad integradora que demanda del estudiante una alta dosis de esfuerzo mental. La RPM, por su valor formativo ha sido objeto de estudio tanto de investigadores en Matemática Educativa (e.g., Polya, 1945, 1957; Schoenfeld, 1985; Goldin, 1987; de Guzmán-Ozamiz, 1991; Fridman, 1995; Santos, 1992; Nápoles y Cruz, 2000; Sigarreta, 2000; Sigarreta y Palacio, 2000; Palacio, 2003). De igual manera, por investigadores asociados con la Psicología, mismos que han realizado aportes significativos al proceso de RPM, entre los que podemos mencionar a Duncker (1945), Newell y Simón (1972), Mayer (1983), Masón *et al.*, (1989), Wertheimer (1991), Bransford y Stein (1993).

Entre las estrategias abordadas para resolver un problema matemático se encuentra la de Polya (1945), que ha inspirado y ha sido utilizado en múltiples estudios e investigaciones, para ello se basó en las observaciones que había realizado como profesor de Matemáticas, llegando a plantear que la resolución de problemas está asociada a procesos cognitivos que tienen como resultado final encontrar salida a una dificultad, una vía para sortear un obstáculo, alcanzando un objetivo que no es inmediatamente alcanzable.

Dicha estrategia consta de cuatro fases, mismas que son contentivas de sendas subfases, y las declara de la manera siguiente: 1. Comprender el problema; 2. Concebir un plan; 3. Ejecución del plan; y, 4. Examinar la solución obtenida. Estas fases las descompone en otras subfases donde sugiere técnicas para resolver problemas, que desde luego no garantizan que se encuentre la solución, pero constituyen una guía para la acción, mismas a las que puede recurrir cuando sea necesario durante el proceso de resolución.

Cabe destacar que la estrategia propuesta por Polya no es aplicable de forma directa en el aula, ya que el autor basa su estrategia en la idea del resolutor ideal, es decir, la persona que al resolver un problema avanza directamente desde el enunciado hasta hallar la solución, sabiendo en cada momento qué hacer y por qué hacerlo, y para concluir, examina la solución, y comprueba que es correcta. Para él, resolver problemas incluye no

solamente la búsqueda de soluciones, sino que incluye argumentar y justificar todo el proceso.

Otros autores han considerado diferentes estrategias para resolver problemas matemáticos, como, por ejemplo: Geissler (1975), Jungk (1979), Schoenfeld (1991), Fridman (1995), Santos (1992), Pérez-Rodríguez (1996), Labarrere (1988), Rizo y Campistrous (1999), Sigarreta (2000, 2004). La mayoría de estos autores coincide en señalar etapas o fases las cuales se encuentran en relación directa con las planteadas por Polya (1945).

Todas las estrategias consideradas para la RPM hacen referencia a una fase o etapa de “comprensión del problema”, aun cuando la nombran de manera diferente, dicha fase está directamente relacionada con la decodificación de la información que se proporciona en el enunciado del problema. El enunciado de un problema matemático es un texto que está conformado por un sistema de signos y símbolos portadores de significado en un contexto, con intención y finalidad bien determinadas.

Dichas estrategias destacan que el resolutor (estudiante) debe de una forma u otra comprender el problema, pero no ofrecer acciones metodológicas explícitas para el logro de este objetivo. Tal situación nos conduce a la búsqueda de alternativas para mejorar la preparación de los profesores y con ello la mejora del proceso de enseñanza aprendizaje en la resolución de problemas.

Materiales y Métodos

Para la elaboración de este artículo se ha recurrido al método del Enfoque Sistémico, en correspondencia con De la Peña y Velázquez (2018) debido a que ofrece garantías para la modelación de problemas de la práctica educativa, tal es el caso de la comprensión del enunciado de problemas matemáticos. A partir de este método analizamos las relaciones e interacciones de las acciones correspondiente a la fase de comprensión del problema, lo que nos permitió sistematizar los elementos de la aproximación metodológica para la comprensión de problemas matemáticos.

Gaulin (2001) aseveró: "Muchos pedagogos piensan que lo importante para realmente enfatizar la resolución de problemas no es resolver más problemas o aplicarlos en la vida cotidiana, lo importante es utilizar la resolución de problemas como el mejor vehículo para enseñar todo, enseñar a través de problemas" Coincidimos con esta afirmación, pues el propósito esencial y primordial es dotar a los estudiantes de estrategias y técnicas que les permitan resolver una amplia gama de situaciones que se le presentan en la vida cotidiana.

Se han esgrimido múltiples motivos para incluir la resolución de problemas en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la matemática, algunas de las cuales mencionamos a continuación:

- Favorece a desarrollar el pensamiento lógico-estructural.
- Justificar la importancia de la Matemática y de los temas objeto de estudio exhibiendo su aplicación a situaciones tanto de la vida práctica como de la ciencia y la tecnología.
- Motivar el estudio de un tema a partir de la presentación de problemas que logren despertar el interés de los estudiantes por dicho tema.
- Introducir nuevos contenidos, particularmente aquellos que pueden ejemplificarse con determinados "problemas tipo".
- Consolidar e integrar contenidos matemáticos, los cuales se han explicado con anterioridad en el contexto áulico.

Desde el pensamiento clásico griego se encuentran referencias sobre la metodología para resolver problemas, pero no es hasta principios del Siglo XX que se encuentran las primeras recomendaciones a los estudiantes, los primeros intentos por "enseñar" a resolver problemas. Estos primeros intentos consisten básicamente en una serie de recomendaciones formales que intentan fijar la atención del alumno sobre la pregunta, leer cuidadosamente, encontrar datos, meditar la respuesta.

El esquema formal exigido comúnmente en la escuela para resolver problemas, y con muy poca incidencia en el desarrollo del pensamiento de los estudiantes, es el siguiente: datos, planteo, cálculo y respuesta. Los profesores continuán viendo la

resolución de problemas como un contenido independiente del resto de los contenidos matemáticos propuestos en los programas y no como un proceso integrador de conocimientos, y esto no favorece el proceso de enseñanza-aprendizaje de la matemática, pues la resolución de problemas está en la base de toda la Matemática que se enseña. Preparar a los alumnos para enfrentar la resolución de problemas matemáticos no es enseñarles a calcular o un determinado procedimiento, es ayudarles a desarrollar sus habilidades, procesos integradores, actitudes, entre otros.

Los argumentos anteriores ponen de manifiesto algunas de las causas que pueden explicar la falta en la resolución de un problema en la escuela. Pueden señalarse muchas otras razones, pero nos referimos a una que desempeña, desde nuestro punto de vista, un papel fundamental y es que no se comprende que las estrategias tienen un carácter heurístico, no algorítmico, no se trata de formar patrones de conducta para utilizar una u otra estrategia a partir de ciertos indicios, sino de dotar a los estudiantes de "herramientas" que puedan utilizar en diferentes contextos, sobre todo en aquellos en que no existe un "camino conocido".

Investigaciones como las desarrolladas por Schoenfeld (1985), Sigarreta (2000), Sigarreta y Palacio (2000), Rizo y Campistrous (1999), Socas, *et al.* (2014), Siniguan (2017), Barajas-Arenas *et al.*, (2018) han puesto de relieve que los estudiantes exhiben una conducta tendente hacia la resolución inmediata de los problemas, sin que medie un proceso de análisis, de razonamiento, estos reciben el problema y apenas sin leerlo ya quieren comenzar a resolverlos, y al no poder hacerlo desisten o plantean que está muy difícil. En otros casos los estudiantes observan las premisas que propone el problema y operan con las premisas del problema, por similitud con situaciones precedentes o simplemente aplican los conocimientos que están abordando en ese momento, sin previo análisis de la exigencia, o sea, si la exigencia planteada está o no vinculada con la información que se ofrece.

Lo anteriormente explicado refuerza la importancia de examinar cuidadosamente el enunciado del problema con la finalidad de

precisar lo dado, lo buscado, así como esclarecer los medios necesarios para enlazar lo dado y lo buscado. Así, la comprensión del problema es una acción básica y juega un papel central en el proceso de resolución de problemas matemáticos.

Algunas estrategias para resolver problemas matemáticos

Dentro de las estrategias que profundizan en la fase de comprensión del problema están las siguientes:

Bransford y Stein (1993) proponen una estrategia para la RPM denominada IDEAL, "con el fin de facilitar la identificación y el reconocimiento de las distintas partes o componentes a tener en cuenta en la resolución de problemas", cuyas fases son:

I: Identificación de los problemas.

D: Definición y representación del problema.

E: Exploración de posibles estrategias.

A: Actuación, fundada en una estrategia.

L: Logros. Observación y evaluación de los efectos de nuestras actividades.

La comprensión del problema se aborda en las dos primeras fases. La primera fase pretende ayudar a identificar el problema. La segunda fase está orientada a precisar el problema en detalle de manera que pueda ser definido y representado con la precisión y el cuidado que sea posible.

La estrategia propuesta por Schoenfeld (1993), propone tres momentos necesarios e imprescindibles para la resolución de problemas en las clases de Matemática en lo cual involucra a estudiantes y profesores.

- Antes de resolver el problema.
- Durante la resolución del problema.
- Después de resolver el problema.

De estas fases la que está relacionada directamente con la fase de comprensión es la denominada, antes de resolver el problema, misma que propone las siguientes acciones:

- Lee el problema, analiza las palabras que podría no entender.

- Usa la discusión en toda la clase, para fijar la atención en la importancia de comprender el problema.

- Ilustra la importancia de la lectura cuidadosa.

- Presta atención al vocabulario especial utilizado.

- Enfoca la atención en los datos de importancia, clarificación del proceso.

- Dar ideas para las posibles vías de resolver el problema.

Rizo y Campistrous (1999) también han incursionado en la fase de comprensión del problema, planteando las siguientes acciones:

- Búsqueda de palabras claves. Esta acción está caracterizada por relacionar el significado de las operaciones aritméticas con determinados vocablos, los cuales se han usado en el contexto escolar, como significado por sinonimia de dichas operaciones aritméticas.

- Procedimiento asociado a un indicador (puede ser un símbolo, la estructura de una expresión, tipos de ecuaciones) textual. Se sustenta en la identificación de determinado enunciado asociado al problema, lo que permite relacionarlo con una tipología de problemas, de los cuales sabe cómo proceder.

- Operar con los números dados en el texto. Está relacionado con la "tendencia ejecutora" reportada en la bibliografía especializada y con la creencia de que para resolver un problema matemático siempre hay que resolver operaciones.

- Identificar los significados de las operaciones en el texto del problema. Esta acción se sustenta en el análisis de lo descrito en el enunciado del problema, el reconocimiento de los significados de las operaciones (aritméticas) involucradas y la utilización de dichas operaciones cuyos significados se corresponden con lo descrito en el enunciado.

Otra estrategia que conforma este grupo es la dada por Sigarreta y Laborde (2004), la cual consta de cinco acciones, cada una de ellas es contentiva de un sistema de acciones en forma de preguntas e indicaciones que tienen como fin la orientación hacia la acción.

Acción I. Aproximación al problema.

Acción II. Profundización en el problema.

Acción III. Ubicación del problema.

Acción IV. Selección y aplicación de una estrategia de trabajo.

Acción V. Representación y Valoración.

Las dos primeras acciones, aproximación al problema y profundización en el problema, están orientadas a la fase de comprensión del problema.

Acción I. Aproximación al problema: Operaciones a realizar: Determina los términos en los que presentes dificultades y esclarece su significado. ¿Qué elementos conoces sobre la actividad que se aborda en el problema? ¿Qué problema vas a enfrentar? ¿Has visto alguno formulado de manera parecida? ¿Está relacionado con tu entorno sociocultural?

Acción II. Profundización en el problema: Operaciones a realizar: ¿Son familiares los términos que intervienen en la formulación del problema? Subraya las expresiones que consideres de mayor valor semántico. Busca sinónimos y antónimos de dichos términos. Establece la(s) incógnita(s), es decir, qué es lo que se busca. Determina los datos que se dan de manera directa en la formulación del problema. ¿Puedes enunciar el problema con tus propias palabras? ¿Podría darse una posible respuesta? En un segundo momento se puede pensar en elaborar un esquema, diagrama, tabla, etc. ¿Son suficientes los datos? ¿Existen datos contradictorios? ¿Hay datos sobrantes? Reformula el problema. ¿Cómo se pueden relacionar los datos con la(s) incógnita(s)? Transforma el problema en otro equivalente.

La comprensión de textos (enunciado del problema) de problemas matemáticos, juega un papel esencial en su proceso de solución. Leer e interpretar el enunciado de un problema matemático no es un acto mecánico de decodificación de signos y símbolos gráficos, de determinar ideas y relaciones presentes en el mismo, sino que es una actividad de razonamiento en la que se trata de guiar las ideas y reflexiones que se obtienen de la lectura hacia la construcción

de un significado para dicho enunciado. Se requiere una lectura analítica y reflexiva.

Dicha lectura favorece que el resolutor interprete el enunciado del problema y pueda construir nuevos significados a partir de su contenido, este proceso se deriva de una lectura individual en la cual se manifiestan avances, detenciones, retrocesos, se relaciona la nueva información con conocimientos previos, se formulan preguntas, se determina lo esencial y lo secundario. En correspondencia con lo anterior se hace necesario utilizar algunos elementos de la lectura analítica y reflexiva: Determinar los objetivos parciales, para obtener información precisa. ¿Qué aborda el texto?, para activar los conceptos e ideas asociado al texto. ¿Qué información se puede extraer de su estructura?, para verificar si sobra, falta o es redundante la información. Releer partes confusas. Elaborar un resumen. Plantear preguntas e hipótesis sobre el texto. Crear imágenes o representaciones mentales para visualizar información del texto (Solé, 1994).

Las acciones anteriores asociadas con las planteadas por Solé (1994), aplican de forma natural a los enunciados de los problemas matemáticos. Para lograr la comprensión de un problema o situación, es imprescindible tomar en consideración los conocimientos previos, el resolutor necesita de cierto conocimiento que le sirve de basamento y sobre el cual construye el nuevo conocimiento, destacando los rasgos más importantes y estables del nuevo conocimiento y relacionándolo con el conocimiento anterior.

La comprensión de un problema se sustenta en un intercambio dinámico donde el mensaje que transmite es decodificado por el resolutor, al mismo tiempo el mensaje incide en el resolutor potenciando, reordenando o reformulando sus experiencias. Por tanto, la interacción entre el resolutor y el mensaje constituye la base de la decodificación del mismo, puesto que, en este proceso de decodificación, el resolutor vincula la información que se presenta, en el enunciado del problema, con el conocimiento que posee. En consecuencia, la esencia del proceso de decodificación de la información que trasmite un mensaje se sustenta en el establecimiento de la

conexión de la nueva información con la ya existente.

Comprender determinada situación es hacer una interpretación razonable, reflexiva e inteligente. La interpretación básicamente es construcción de significado y adquisición de conocimientos. Por tanto, comprender el enunciado de un problema matemático presupone la construcción de significado a partir del mensaje escrito y adquisición de conocimientos.

Según Garriga (2003), efectuar la comprensión de un texto dentro del tratamiento metodológico comprende:

- Percepción del texto (lectura o audición).
- Reconocimiento de las palabras claves.
- Determinación de los grupos semánticos o ideas esenciales.

En el mismo sentido Neri y Zalazar (2007) ofrece elementos para la comprensión de textos, de ellos asumimos para este estudio los siguientes: Trabajo con las palabras claves y de difícil comprensión que aparecerán en el texto. Realización de preguntas predictivas.

Para la comprensión de los problemas matemáticos, se debe, en un primer momento, traducir el contenido del mismo del lenguaje común al lenguaje matemático, luego para interpretar el texto tenemos que decodificar la idea central de éste a partir de la utilización entre otros recursos de: símbolos matemáticos, operaciones, representación gráfica, ecuaciones, sistemas de ecuaciones, etc.

Resultados

Aproximación metodológica a la comprensión de problemas matemáticos

Un porcentaje importante para alcanzar el éxito en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la resolución de un problema matemático está dado en la comprensión que se tenga del mismo. Esta es una de las principales dificultades, sino la principal dificultad, que enfrentan los profesores de matemática para guiar a los estudiantes en el proceso de resolución de problemas matemáticos, debido a que no cuentan con la preparación requerida para ello. La siguiente propuesta

constituye una aproximación metodológica para facilitar el logro de este objetivo.

1. Lectura reflexiva del enunciado del problema. Realizar la lectura reflexiva del enunciado del problema como aspecto fundamental para su comprensión, logrando así una representación mental clara de la situación que se está leyendo. Analizar los conceptos, las ideas y relaciones que se expresan, determinando de qué trata el problema. ¿Qué es lo pedido o buscado? ¿Qué es lo dado o conocido? ¿Son suficientes los datos? ¿Existen datos contradictorios? ¿Hay datos sobrantes? Releer las partes confusas, reconocer los términos o conceptos claves y las ideas principales expresadas en el mismo.

2. Identificar los conceptos y frases de mayor carga semántica. Estas son las frases y conceptos claves del problema que le confieren significado en un contexto determinado. Una vez identificados se determinará el significado de los mismos, inicialmente, y en correspondencia con el contexto que involucra el problema, lo cual es esencial para el proceso de comprensión y/o decodificación de las ideas.

3. Esclarecer el significado de esos conceptos o frases. Se trata ahora de buscar todos los significados asociados a esos conceptos o frases en diferentes contextos, y otras formas de representar la misma idea, lo cual nos ayuda a poder descifrar y decodificar frases e ideas. Siempre tratando de contextualizar esos significados con las exigencias del problema.

4. Dividir el enunciado del problema en partes lógicas. Esta separación del enunciado del problema en sus partes lógicas o ideas principales es muy importante porque así queda dividido en partes más pequeñas, sin perder su idea central, lo cual facilita poder desmenuzar su significado y lograr una mejor y más rápida comprensión. Para esta separación se pueden tener en cuenta los signos de puntuación y los conectores. Estas partes lógicas pueden ser escritas de manera separada para que nos faciliten su comprensión.

5. Traducir cada parte lógica, del lenguaje común al lenguaje matemático. Para ellos se utilizará la representación adecuada (algebraica, geométrica o analítica), seleccionada

cuidadosamente en correspondencia con las exigencias y el significado de cada parte. Se determinarán y se representarán las relaciones matemáticas tomando en consideración las ideas representadas en cada parte lógica, valorando si es necesario, la posibilidad de elaborar medios auxiliares para ayudar a comprender la situación.

6. Interpretar el enunciado del problema completo. Se logra cuando se es capaz de emitir juicio(s) contextualizado(s) acerca del enunciado del problema, es decir, el resolutor logra plantear con claridad que es lo que se quiere obtener, si puede enunciarlo de otra manera o en forma equivalente. Si puede formular un modelo matemático adecuado (una ecuación, un sistema de ecuaciones, una función, etc.) que sirva para darle solución al problema, tomando en consideración las interpretaciones hechas en el paso anterior.

7. Extrapolación. Aquí puede valorarse si es posible formular otro modelo y resolverlo por otra vía, si puede ser generalizado, si es posible que el problema pueda ser planteado en otro contexto.

Ejemplos:

A continuación, se proponen tres problemas resueltos donde se aplica la aproximación metodológica para la comprensión de problemas matemáticos.

P1) Hace 10 años la edad de Juan era las $\frac{3}{5}$ partes de la edad que tendrá dentro de 20 años. Cuál es la edad actual de Juan.

En este caso no existen palabras de difícil significado, se pueden obtener tres partes lógicas, una sería: hace 10 años la edad de Juan era, la otra

sería: la edad que tendrá dentro de 20 años y la última: la edad actual de Juan. La dificultad está dada en que intervienen tres tiempos gramaticales en el problema, presente, pasado y futuro. La Tabla 1 presenta una traducción del lenguaje común al lenguaje matemático de las partes lógicas del enunciado del problema. Para completar la tabla debemos saber que para conocer la edad que se tenía hace 10 años basta con restar 10 a la edad actual y, de manera análoga, para calcular la edad que se tendrá dentro de 20 años se debe sumar 20 a la edad actual, y de manera general, cómo obtener una edad a partir de la siguiente o de la anterior. Se debe ser cuidadoso al declarar las variables, pues esto puede hacerse de varias formas, teniendo en cuenta las relaciones dadas en el enunciado del problema, es decir, depende de la edad de referencia tomada para expresar las otras dos edades según el tiempo. Nótese que según elijamos la variable se van a obtener modelos (analítico–algebraico) equivalentes.

Después de elaborada la tabla, se procederá a la interpretación total (relacionar las partes lógicas) de manera que podamos encontrar el modelo que nos conduzca a la solución del problema, en este caso resulta que dicho modelo es una ecuación lineal.

Primera vía de solución algebraica (utilizando la primera interpretación). Sea X la edad actual que se tomó como referencia porque las demás edades dependen de ella por suma o resta. Escribir el modelo (ecuación) que resulta de la interpretación del enunciado del problema, en este caso, no resulta difícil debido a que se conocen las expresiones que intervienen.

Tabla 1: Traducción del lenguaje común al lenguaje matemático de las partes lógicas del enunciado.

Edad de Juan	Edad hace 10 años	Edad actual	Edad dentro de 20 años
Primera interpretación	$X - 10$	X	$X + 20$
Segunda interpretación	$X - 30$	$X - 20$	X
Tercera interpretación	X	$X + 10$	$X + 30$

$$X - 10 = 3/5 (X + 20)$$

cuya solución es $X = 55$, lo cual implica que la edad actual de Juan es 55 años.

En la confección de la tabla también se tuvieron en cuenta otras posibilidades. Declarar como variable la edad que se tendrá dentro de 20 años y luego restar 20 para la edad actual y 30 para la edad hace 10 años o también comenzar declarando como variable la edad que tenía hace 10 años y obtener las restantes por suma. Es importante que estas variantes no dejen de analizarse, pues constituyen parte de la comprensión del problema, puesto que conducen a formular diferentes modelos mediante los cuales se obtiene la solución al problema.

Segunda vía de solución aritmética. La variante de solución presentada aquí es aritmética, para la cual consideraremos la relación parte-todo. Tomaremos como el todo a la edad de Juan dentro de 20 años, una de las partes es la edad de Juan hace 10 años, la cual está relacionada con las $3/5$ partes (del todo) de la edad de Juan dentro de 20 años, por lo que la otra parte (del todo) de la edad de Juan dentro de 20 años, o sea los $2/5$ de la edad de Juan dentro de 20 años es igual a 30 años. Entonces, la edad que tendrá Juan dentro de 20 años es de 75 años, y por tanto, la edad actual de Juan es 55 años. El gráfico de la Figura 1 ilustra el razonamiento previo.

P2) Poeta español que vivió en el siglo XIX y es considerado un clásico absoluto del movimiento romántico en este siglo. Influye notablemente en la obra de poetas del siglo XX como Antonio Machado y Rafael Alberti. Se conoce que el año de su nacimiento es un número par, además la suma de sus cifras básicas es 18. ¿En qué año nació este poeta?

El problema presenta un enunciado con una información que le aporta cultura general al estudiante, además, contiene conceptos o términos que están relacionados con lo que se pide en el problema. Para una mejor comprensión del problema, separemos su enunciado en las partes lógicas y aclaremos el significado de cada una de estas partes.

Partes lógicas

Poeta español que vivió en el siglo XIX y es considerado un clásico absoluto del movimiento romántico en este siglo. Significa que desarrolló completamente su vida en el siglo XIX, o sea entre 1800 y 1899, por consiguiente, el año de su nacimiento tiene la forma $18ab$. Este es un elemento importante en la búsqueda de lo que se quiere. Además, como información adicional se obtiene que este poeta es de nacionalidad española y alcanzó renombre dentro del romanticismo como literato (nótese que dicha información es irrelevante en la resolución del

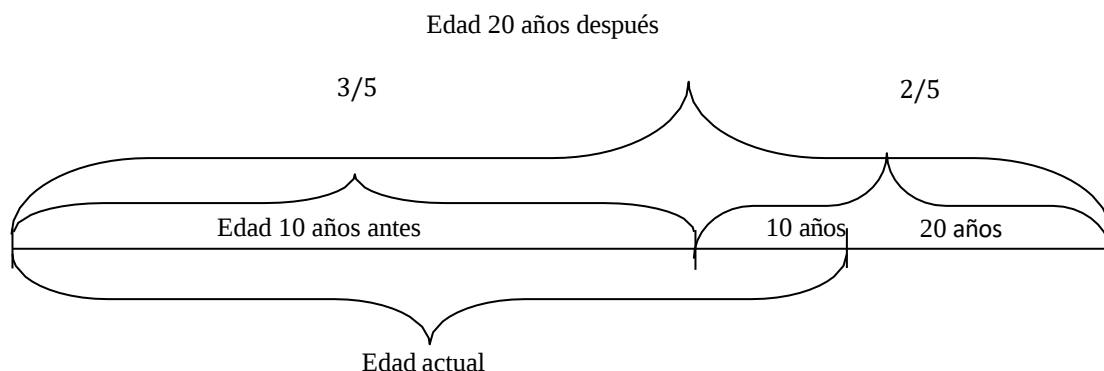


Figura 1. Modelado gráfico del problema.

problema). *Influye notablemente en la obra de poetas del siglo XX como Antonio Machado y Rafael Alberti.* Esta idea tampoco aporta elementos para la resolución, tienen como finalidad enriquecer el acervo cultural del estudiante. *Se conoce que el año de su nacimiento es un número par,* significa que el número buscado termina en un dígito par, o sea, $b \in \{0, 2, 4, 6, 8\}$. *La suma de sus cifras básicas es 18.* Esta última parte quiere decir que $1 + 8 + a + b = 18$, lo que equivale a decir que $a + b = 9$, por lo que se tendría que $a \in \{9, 7, 5, 3, 1\}$. De todo lo antes expuesto se deducen las siguientes posibilidades para el año de nacimiento del poeta: 1890, 1872, 1854, 1836, 1818. Observemos que por las condiciones dadas en el problema no se puede saber exactamente el año de nacimiento del poeta. Este es un problema con datos insuficientes y datos superfluos.

P3) Un cuadrado y un triángulo equilátero están inscritos en una circunferencia de radio unitario, además, un vértice del triángulo coincide con uno del cuadrado. Hallar el área común al triángulo y al cuadrado.

En este problema aparecen conceptos o términos claves en el proceso de resolución. Separemos el enunciado del problema en sus partes lógicas y aclaremos el significado de cada una de estas partes.

Partes lógicas

Un cuadrado y un triángulo equilátero están inscritos en una circunferencia de radio unitario. Significa que tanto los vértices del cuadrado como los del triángulo equilátero yacen en la circunferencia de radio una unidad, por otro lado, que sean cuadrado y triángulo equilátero implican un grupo de propiedades y relaciones métricas que podemos utilizar en el proceso de comprensión y resolución. También debe considerarse en el proceso de resolución las relaciones de ángulos inscritos en la circunferencia y teoremas relativos. Son conceptos con gran carga semántica: cuadrado, triángulo equilátero y polígono regular inscrito en la circunferencia (Figura 1).

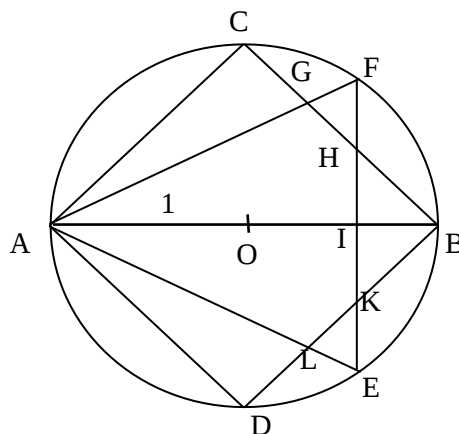


Figura 1 Figura de análisis

Un vértice del triángulo coincide con uno del cuadrado. Esta condición significa que tenemos que fijar un vértice de tal forma que éste pertenezca a las dos figuras. Esta parte del enunciado del problema no luce muy prometedora, pero en un análisis más profundo de esta condición, podemos ver que la misma fija la posición del triángulo en relación con el cuadrado y de esta manera la figura geométrica que se tiene es única, de donde se tienen relaciones de simetría de la figura, aspecto que facilitará la búsqueda de la exigencia del problema (el área común al triángulo y al cuadrado).

Para facilitar la comprensión del problema y la búsqueda de la solución dibujaremos una figura de análisis: Sea la circunferencia de centro en O y diámetro AB (2 unidades), ACBD cuadrado y AEF triángulo equilátero inscritos en la circunferencia: A vértice común a ambos polígonos. Lo que se pide de acuerdo con la figura elaborada es determinar el área del pentágono AGHKL.

Primera vía de solución (Geometría Euclidiana).

Usamos la técnica de descomponer la figura (que se desea obtener el área), en figuras cuyas áreas se calculen de manera sencilla (ver Figura 2), para ello tomaremos en consideración la simetría de la figura, el área que se pide calcular es: $A_{AGHKL} = 2(A_{AGB} - A_{BHI})$. Para lograr este objetivo, tracemos GM perpendicular a AB (M yace en AB) y unimos a B con F.

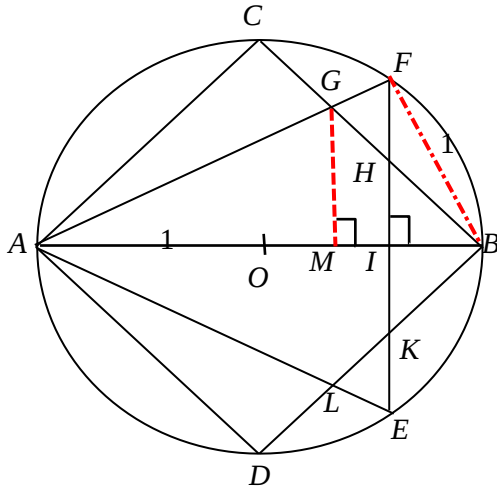


Figura 2. Figura de análisis.

La figura es axialmente simétrica con respecto al diámetro ($AB = 2$). Tenemos que $BF = 1$, ya que el triángulo ABF es rectángulo en F (observa que $\angle BFA$ está inscrito en la semicircunferencia), el diámetro es 2 y el ángulo opuesto $\angle BAF = 30^\circ$. Además, aplicando el teorema de Pitágoras al mismo triángulo se tiene que $AF = \sqrt{3}$, lado del triángulo equilátero AEF .

El $\angle BFE = 30^\circ = \angle BFI$ por estar inscrito en el mismo arco que $\angle BAE = 30^\circ$, y el triángulo BFI es rectángulo en I por lo que el cateto que se opone al ángulo de 30° es la mitad de la hipotenusa. De esta manera, $BI = \frac{1}{2}$

$\sphericalangle ABC = 45^\circ = \sphericalangle HBI$, ya que AB es diagonal del cuadrado y por tanto biseca sus ángulos opuestos, y como el triángulo BHI es rectángulo en I , entonces $\sphericalangle IBH = 45^\circ$ y $BI = HI$. Por tanto, $A_{BHI} = \frac{1}{8}$.

Ahora, calculemos la longitud de GM que es la altura relativa al lado AB del triángulo ABG . Nótese que $GM = \frac{1}{2}AG$. Para ello haremos uso del teorema de Stewart (aplicado al triángulo ABF), siendo la ceviana BG .

$$AF \cdot BG^2 = BF^2 \cdot AG + AB^2 \cdot GF - AG \cdot GF \cdot AF.$$

$$\sqrt{3} \cdot BG^2 = 1^2 \cdot AG + 2^2 \cdot (\sqrt{2} - AG) - AG \\ \cdot (\sqrt{2} - AG) \cdot \sqrt{3}.$$

Reduciendo la expresión anterior se obtiene,

$$BG^2 = AG^2 - 4\sqrt{3}AG + 4.$$

De igual manera, se deduce que $BG^2 = \frac{AG^2}{2}$ (aplicando el teorema de Pitágoras al triángulo rectángulo isósceles BGM). Sustituyendo esta expresión llegamos a la siguiente ecuación: $AG^2 - 4\sqrt{3}AG + 8 = 0$.

Los valores que satisfacen esta ecuación son $AG = 2\sqrt{3} \pm 2$, pero como $AG < \sqrt{3}$, entonces

$$AG = 2(\sqrt{3} - 1).$$

$$GM = \sqrt{3} - 1.$$

Finalmente, el área buscada $A = 2(A_{AGB} - A_{BHI})$.

$$A = 2(\sqrt{3} - 1) - \frac{1}{4}.$$
$$A = \frac{8\sqrt{3} - 9}{4}.$$

Segunda vía de solución (Geometría Analítica).
En esta vía utilizaremos técnicas específicas de la Geometría Analítica como es el cálculo de coordenadas de puntos de intersección entre rectas. Hagamos coincidir el eje “x” con una de las diagonales del cuadrado y al eje “y” con la otra diagonal (ver Figura 3).

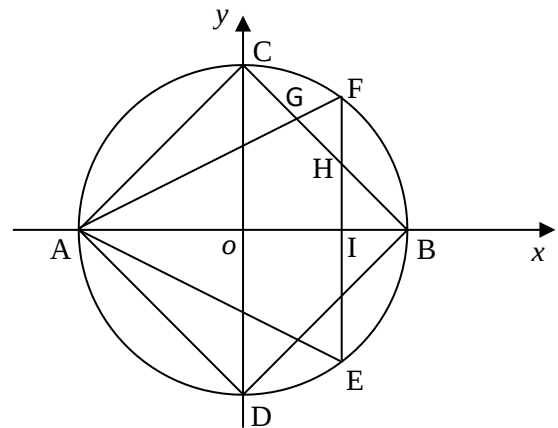


Figura 3. Figura de análisis.

Por la simetría de la figura el área que se pide calcular es: $A = 2(A_{AGB} - A_{BHI})$. Para lograr este objetivo, basta con encontrar las coordenadas de los puntos G y H . Como la circunferencia tiene radio unitario y tiene su centro en el origen de coordenadas, entonces tiene como ecuación $x^2 + y^2 = 1$, y, por tanto, se deduce que $A(-1; 0)$, $B(1; 0)$, $C(0; 1)$, $D(0; -1)$.

Como el eje " x " es bisectriz del ángulo $\angle EAF = 60^\circ$, la ecuación de la recta que contiene a A y a F es $y = \frac{\sqrt{3}}{3}x + \frac{\sqrt{3}}{3}$ y la ecuación de la recta que pasa por B y C es $y = -x + 1$. Con estas dos ecuaciones podemos hallar las coordenadas del punto G , $G(2 - \sqrt{3}; \sqrt{3} - 1)$, $F(\frac{1}{2}; \frac{\sqrt{3}}{2})$ y $H(\frac{1}{2}; \frac{1}{2})$, por lo que $A = 2(\sqrt{3} - 1) - \frac{1}{4} = \frac{8\sqrt{3}-9}{4}$.

Conclusiones

La aproximación metodológica a la comprensión de problemas matemáticos se sustenta en el papel preponderante y esencial, que desempeña la fase comprensión en el transcurso del proceso de resolución de problemas matemáticos, para emprender acciones orientadas a la búsqueda de una determinada solución. Cabe destacar que en el proceso de RPM solo se puede tener opciones de éxito si se ha comprendido cabalmente su enunciado. La propuesta constituye una herramienta didáctica para favorecer la comprensión de problemas y superar dificultades metodológicas, y de aprendizaje, presentadas tanto por estudiantes como por profesores en formación, durante la enseñanza aprendizaje de la matemática en general.

Referencias

- Barajas-Arenas, C., Parada-Rico, S.E., Molina-Zavaleta, J.G. (2018). Análisis de dificultades surgidas al resolver problemas de variación. *Educación Matemática*, 30, 297-323. <https://doi.org/10.24844/EM3003.12>
- Bransford, J.D., Stein, D. (1993). Solución IDEAL. Guía para mejor pensar, aprender y crear problemas. Editorial Labor, Barcelona. <https://es.scribd.com/document/701598059/Solucion-Ideal-de-Problemas>
- de Guzmán-Ozamiz, M. (1991). Para pensar mejor, Editorial Labor, Barcelona.
- PARA PENSAR MEJOR | MIGUEL DE GUZMAN OZAMIZ | LABOR | Casa del Libro México
- De la Peña-Consuegra, G., Velázquez-Ávila, R.M. (2018). Algunas reflexiones sobre la teoría general de sistemas y el enfoque sistémico en las investigaciones científicas. *Revista Cubana Educación Superior*, 37, 31-44.
- Duncker, K. (1945). On Problem-Solving. *Psychological Monographs*, 58, 1-113. <http://dx.doi.org/10.1037/h0093599>
- Fridman, L.M. (1995). Metodología para resolver problemas de Matemáticas. Grupo Editorial Ibero América S.A. México. <https://es.scribd.com/document/442946959/El-Gran-Gauss-Metodologia-para-resolver-problemas-de-matematicas-2000-Lev-Milton-Fridman-pdf>
- Garriga, E. (2003). El tratamiento de los componentes funcionales: comprensión, análisis y construcción de textos, en "Acerca de la enseñanza del español y la Literatura". Romeo, Angelina, Ed. Pueblo y Educación. La Habana.
- Gaulin, G. (2001). Tendencias Actuales de la resolución de problemas. *Sigma. Revista de Matemática*, 19, 51-63.
- Geissler, E. (1975). Metodología de la enseñanza de la Matemática de 1. a 4. grado. Tercera Parte. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba. [Metodología de la enseñanza de la matemática de 1o. A 4o Grado Tercera parte \(minedu.gob.bo\)](http://metodologia.de.la.enseñanza.de.la.matematica.de.1o.a.4o.grado.tercera.parte.minedu.gob.bo)
- Goldin, G.A. (1987). Cognitive representational systems for mathematical problem solving. In: C. Janvier (Ed.). Problems of representation in the teaching and learning of mathematics (pp. 125-145). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. researchgate.net/profile/Gerald-Goldin/publication/250890298_Affective_Pathways_and_Representation_in_Mathematical_Problem_Solving/links/549c88220cf2b8037138bf39/Affective-Pathways-and-Representation-in-Mathematical-Problem-Solving.pdf
- Jungk, W. (1979). Conferencias sobre metodología de la enseñanza de la Matemática.

- Primera Parte. La Habana, Cuba: Libros para la Educación.
- Labarrere A.F (1988). Como enseñar a los alumnos de primaria a resolver problemas. Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
[Detalles de: Cómo enseñar a los alumnos de primaria a resolver problemas / > BiblioGTQ Koha \(upn.mx\)](#)
- Masón, J., Burton, L., Stacey, K. (1989). Pensar matemáticamente. Editorial Labor-MEC. Barcelona. S.A.
[Pensar matemáticamente - John Mason, Leone Burton, Kaye Stacey - Google Books](#)
- Mayer, R.E. (1983). Thinking, problem solving and cognition. Editorial. W. H. Freeman, New York.
[Review: \[Untitled\] on JSTOR](#)
- Nápoles, J.E., Cruz, M. (2000). La resolución de problemas en la escuela. Algunas reflexiones. Función Continua, 8, 21-42.
[La resolución de problemas en la escuela. Algunas reflexiones - Funes \(uniandes.edu.co\)](#)
- Neri, C., Fernández-Zalazar, D. (2007). La lectura en tiempos de Internet.
<https://es.scribd.com/document/385100289/Fernandez-Zalazar-y-Neri-La-lectura-en-tiempos-de-Internet-pdf>
- Newell, A., Simon, H.A. (1972). Human problem solving. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
[Human problem solving : Newell, Allen : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive](#)
- Palacio, J. (2003). Didáctica de la Matemática: Búsqueda de relaciones y contextualización de problemas. Fondo Editorial del Pedagógico San Marcos. Lima, Perú.
- Pérez-Rodríguez, G. (1996). Metodología de la investigación educacional, Parte I. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.
https://books.google.com.mx/books/about/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_educac.html?hl=es&id=pfEkKAAACAAJ&redir_esc=y
- Polya, G. (1945). How to solve it. Editorial Tecnos. Madrid.
- Polya, G. (1957). How to solve it. Princeton University Press, U.S.A.
- [How To Solve It : George Polya : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive](#)
- Rizo, C., Campistrous, L. (1999). Estrategias de resolución de problemas en la escuela. RELIME, 2, 31-45.
- Santos, L.M. (1992). Resolución de problemas, el trabajo de Alan Schoenfeld: Una propuesta a considerar en el aprendizaje de las matemáticas. Revista Educación Matemática, 4, 16-24.
[Resolución de problemas; el trabajo de Alan Schoenfeld: una propuesta a considerar en el aprendizaje de las matemáticas - Funes \(uniandes.edu.co\)](#)
- Schoenfeld, A.H. (1985). Mathematical Problem Solving. Academic Press New York, New York.
[Mathematical Problem Solving - ALAN H. SCHOENFELD - Google Books](#)
- Schoenfeld, A.H. (1991). Learning to think mathematically. Problem Solving, metacognition and sense making in mathematics. Universidad de California, 1991.
omi.fmi.uni-sofia.bg/wp-content/uploads/2020/02/LearningtoThinkMathematically_AHS.pdf
- Schoenfeld, A.H. (1993). Resolución de problemas. Elementos para una propuesta en el aprendizaje de las Matemáticas. En Cuadernos de Investigación, México D.F. Número 25, julio 1993.
- Sigarreta, J.M., Laborde, J.M. (2004). Estrategias para la Resolución de Problemas como recurso para la interacción sociocultural. Revista de la Sociedad Argentina de Educación Matemática, 20, 17-29.
- Sigarreta, J.M., Palacio, J. (2000). Estrategia para la resolución de problemas matemáticos utilizando como recurso los números complejos. En Actas del Evento Internacional Compumat' 2000. Universidad de la Cuenca del Plata – ISP “Blas Roca Calderío”
- Siniguian, M.T. (2017). Students Difficulty in Solving Mathematical Problems. International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences, 6. 1-12.
[1.pdf \(garph.co.uk\)](#)
- Socas, M.M., Hernández, J., Palarea, M.M. (2014). Dificultades en la resolución de problemas de Matemáticas de estudiantes para

Profesor de Educación Primaria y Secundaria.
In: J.L. González, J.A. Fernández-Plaza, E. Castro-Rodríguez, M.T. Sánchez-Compañá, C. Fernández, J.L. Lupiáñez, L. Puig (Eds.), *Investigaciones en Pensamiento Numérico y Algebraico e Historia de las Matemáticas y Educación Matemática* - 2014 (pp. 145-154). Málaga: Departamento de Didáctica de las Matemáticas, de las Ciencias Sociales y de las Ciencias Experimentales y SEIEM.

[Socas2014DificultadesInvestigaciones.pdf \(uniandes.edu.co\)](#)

Solé, I. (1994). *Estrategia de Lectura*. Editorial Garó, Barcelona.

[\(Microsoft Word - SOL\311, Isabel. cap 4. La ense\361anza de estrategias.rtf\) \(utp.edu.co\)](#)

Wertheimer, M. (1991). *El pensamiento Productivo*. Editorial Paidós, Barcelona

[El pensamiento productivo - Max Wertheimer - Google Books](#)

Doi.

Artículo de investigación

Actividad antirradicalaria y encapsulación de extractos de plantas usadas en la medicina tradicional del estado de Guerrero

Antiradical activity and encapsulation of plant extracts used in traditional medicine in the state of Guerrero

Atividade antirradical e encapsulação de extratos vegetais utilizados na medicina tradicional no estado de Guerrero

Fabiola López-Zenaido¹ ID. 0009-0009-6567-5651
Ma. Elena Moreno-Godínez² ID. 0000-0001-7080-6323
Angélica Catalán-Neira³ ID. 0000-0002-6267-038X
Patricia Álvarez-Fitz^{4*} ID. 0000-0001-5991-4577

¹Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas, S/N Ciudad Universitaria, Col. La Haciendita, 39070, Chilpancingo, Guerrero, México.

²Laboratorio de Toxicología y Salud Ambiental. Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas, S/N Ciudad Universitaria, Col. La Haciendita, 39070, Chilpancingo, Guerrero, México.

³Jardín Botánico. Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas, S/N Ciudad Universitaria, Col. La Haciendita, 39070, Chilpancingo, Guerrero, México.

⁴CONAHCyT - Universidad Autónoma de Guerrero, Av. Lázaro Cárdenas s/n, Ciudad Universitaria Sur, Col. La Haciendita, 39070, Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia paty_fitz@hotmail.com

Enviado: 03/02/2024

Revisado: 06/03/2024

Aprobado: 08/05/2024

Publicado: 15/06/2024

Resumen

En el estado de Guerrero muchas plantas son utilizadas debido a sus propiedades medicinales, valor cultural y nutricional. Actualmente existe un interés en la investigación de plantas medicinales que puedan ser utilizadas en la industria farmacéutica, de los alimentos y cosmética. El objetivo del trabajo fue evaluar la actividad antirradicalaria y encapsular los extractos acuosos obtenidos de siete plantas utilizadas en la medicina tradicional en el estado de Guerrero. Los extractos acuosos de *Justicia spicigera* (muicle), *Artemisia ludoviciana* (estafiate), *Kalanchoe daigremontiana* (kalanchoe), *Coleus hadiensis* (vaporub), *Eucalyptus globulus* (eucalipto) *Tecoma stans* (nixtamaxuchitl) y *Cascabela thevetioides* (yoyote) se obtuvieron mediante el método de infusión. La actividad antirradicalaria se determinó mediante el método de DPPH•. Los encapsulados se obtuvieron mediante la técnica de gelificación iónica utilizando alginato de sodio. Los extractos que presentaron la mayor actividad captadora del radical DPPH• fueron K.

daigremontiana (kalanchoe), *E. globulus* (vaporud), *T. stans* (nixtamaxuchitl) y *C. thevetioides* (yoyote) ($p < 0.001$). Se obtuvieron encapsulados con formas esféricas irregulares y tamaños promedios de 4.19-5.02 mm. Los extractos acuosos encapsulados de las plantas *K. daigremontiana* (kalanchoe), *E. globulus* (vaporud), *T. stans* (nixtamaxuchitl) y *C. thevetioides* (yoyote) representan una nueva alternativa para la obtención de productos naturales antioxidantes, saludables e innovadores que pudieran utilizarse en un futuro en la industria farmacéutica, alimentaria y cosmética.

Palabras clave: actividad antirradicalaria, gelificación iónica, encapsulación, extractos acuosos, extractos de plantas

Abstract

In the State of Guerrero many plants are used due to their medicinal properties, cultural and nutritional value. Currently there is interest in research into medicinal plants that can be used in the pharmaceutical, food and cosmetic industries. The objective of the work was to evaluate the antiradical activity and encapsulate aqueous extracts obtained from seven plants used in traditional medicine in the State of Guerrero. The aqueous extracts of *Justicia spicigera* (muicle), *Artemisia ludoviciana* (estafiate), *Kalanchoe daigremontiana* (kalanchoe), *Coleus hadiensis* (vaporub), *Eucalyptus globulus* (eucalipto), *Tecoma stans* (nixtamaxuchitl) and *Cascabela thevetioides* (yoyote) were obtained by the method of infusion. The antiradical activity was determined by the DPPH• method. The encapsulates were obtained through the ionic gelation technique using sodium alginate. The extracts that presented the highest DPPH• radical scavenging activity were *K. daigremontiana* (kalanchoe), *E. globulus* (vaporud), *T. stans* (nixtamaxuchitl) and *C. thevetioides* (yoyote) ($p < 0.001$). Encapsulated with irregular spherical shapes and average sizes of 4.19-5.02 mm were obtained. The encapsulated aqueous extracts of the plants *K. daigremontiana* (kalanchoe), *E. globulus* (vaporud), *T. stans* (nixtamaxuchitl) and *C. thevetioides* (yoyote) represent a new alternative for obtaining antioxidant, healthy and innovative natural products that could be used in the future in the pharmaceutical, food and cosmetic industries.

Keywords: antiradical activity, ionic gelation, encapsulation, aqueous extracts, plant extracts

Resumo

No estado de Guerrero, muitas plantas são utilizadas por suas propriedades medicinais, valor cultural e valor nutricional. Atualmente, há interesse em pesquisar plantas medicinais que possam ser utilizadas nas indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética. O objetivo deste estudo foi avaliar a atividade antioxidante e encapsular extratos aquosos obtidos de sete plantas utilizadas na medicina tradicional do estado de Guerrero. Extratos aquosos de *Justicia spicigera* (muicle), *Artemisia ludoviciana* (estafiate), *Kalanchoe daigremontiana* (kalanchoe), *Coleus hadiensis* (vaporub), *Eucalyptus globulus* (eucalipto), *Tecoma stans* (nixtamaxuchitl) e *Cascabela thevetioides* (yoyote) foram obtidos pelo método de infusão. A atividade antioxidante foi determinada pelo método DPPH₂. As encapsulações foram obtidas pela técnica de gelificação iônica com alginato de sódio. Os extratos que apresentaram a maior atividade de eliminação do radical DPPH• foram os de *K. daigremontiana* (kalanchoe), *E. globulus* (vaporud), *T. stans* (nixtamaxuchitl) e *C. thevetioides* (yoyote) ($p < 0,001$). Estes foram encapsulados com formatos esféricos irregulares e tamanhos médios de 4,19–5,02 mm. Os extratos aquosos encapsulados de *K. daigremontiana* (kalanchoe), *E. globulus* (vaporud), *T. stans* (nixtamaxuchitl) e *C. thevetioides* (yoyote) representam uma nova alternativa para a obtenção de produtos naturais antioxidantes inovadores e saudáveis, que poderão ser utilizados futuramente nas indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética.

Palavras-chave: atividade antirradical, gelificação iônica, encapsulamento, extratos aquosos, extratos vegetais.

Introducción

En México, la medicina tradicional es una opción

utilizada de manera histórica en diferentes culturas y subculturas étnicas, afrodescendientes, mestizas, urbanas y rurales (Jasso-Gándara *et al.*, 2020; Urióstegui-Flores y Villaseñor-Franco, 2021). México cuenta con aproximadamente 5000 especies de plantas medicinales y la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que el 80% de la población mundial ha consumido alguna en fresco (consumo directo), en infusiones o en presentaciones homeopáticas al menos una vez en su vida (Martínez, 1996; Guzmán *et al.*, 2017; OMS, 2013). El consumo de plantas

medicinales ha aumentado en los últimos años debido a sus propiedades farmacológicas, su bajo costo, alta disponibilidad y efectos secundarios reducidos. Además, la OMS sugiere la adopción de prácticas tradicionales como una herramienta para mantener la salud (OMS, 2013). Si bien, se conoce que las plantas son medicinales, se ha documentado que sus propiedades biológicas se deben al amplio espectro de compuestos bioactivos presentes en ellas, como los alcaloides, carotenoides, flavonoides, taninos, terpenos y saponinas, entre otros (Vitale *et al.*, 2022).

Actualmente, es cada vez más evidente que los ingredientes que se consideran nutraceuticos

(extractos de plantas, proteínas, productos derivados de probióticos, entre otros) se ofrezcan en novedosas presentaciones. Con la finalidad de adaptarse a las nuevas tendencias en el área de los alimentos, se ha desarrollado la encapsulación, para proteger productos alimenticios, farmacéuticos, cosméticos y productos naturales donde ya se empiezan a microencapsular pigmentos como licopeno, luteína, antocianinas, astaxantinas (carotenoides de animales acuáticos), pigmentos de flores y de nopal (Ortiz-Romero *et al.*, 2021; Neira-Carrillo *et al.*, 2013). La técnica consiste en recubrir los productos con material generalmente polimérico (alginato, maltodextrina y almidones). La encapsulación desempeña un rol importante en la industria, y las compañías y centros de investigación buscan nuevos ingredientes antioxidantes (extractos, fitoquímicos, fitoesteroles, pro y prebióticos, polifenoles) con posibles beneficios que puedan ser encapsulados y con potencial de uso en alimentos, fármacos o cosméticos (Neira-Carrillo *et al.*, 2013).

En Guerrero, los grupos indígenas conservan el conocimiento tradicional sobre el uso de plantas medicinales en diversas regiones (la Costa Chica, Taxco, Tixtla, la Montaña y la Estacada). Dentro de los usos que se les da a las plantas se encuentran para aliviar la tos, fiebre, diarrea, dolores estomacales, hemorroides, dolor de muelas, infecciones urinarias, dolor de cabeza, conjuntivitis, vomito, gripa, infecciones de la piel, cáncer, diabetes, disentería entre otras (Barrera, 1998; Juárez-Vázquez *et al.*, 2013; Barrera-Catalán *et al.*, 2015; Urióstegui-Flores, 2015; Mendoza-Maldonado *et al.*, 2020; Urióstegui-Flores y Villaseñor-Franco, 2021).

El objetivo de este trabajo fue determinar la actividad antirradicalaria y encapsular los extractos acuosos obtenidos de plantas utilizadas en la medicina tradicional del estado de Guerrero.

Material y métodos

Material vegetal

Las hojas de *Justicia spicigera* Schltdl. (muicle), *Artemisia ludoviciana* Nutt. (estafiate), *Kalanchoe daigremontiana* Raym-Hamet & H. Perrier. (kalanchoe), *Coleus hadiensis* (Forssk.)-A.J. Paton. (vaporub), *Eucalyptus globulus* Labill.

(eucalipto) *Tecoma stans* (L.) Juss. Ex Kunth. (nixtamaxuchitl) y las flores de *Cascabela thevetioides* (Kunth) Lippold. (yoyote) se colectaron en el Jardín Botánico de la Universidad Autónoma de Guerrero. Fueron autenticadas por la M. en C. Angélica Catalán Neria y cuentan con los siguientes números de catálogo 71.3, 75.1, 23.5, 81.1, 42.2, 11.2 y 6.2 respectivamente.

Obtención de extractos y Preparación de encapsulados

Para la obtención del extracto acuoso, las hojas de *J. spicigera*, *A. ludoviciana*, *K. daigremontiana*, *C. hadiensis*, *E. globulus* y *T. stans* y las flores *C. thevetioides* (Figura 1A-G) se limpiaron y se cortaron en trozos de aproximadamente 3 x 2 cm. Posteriormente, el material vegetal (20 g) se sometió a una extracción sólido-líquido mediante la técnica de infusión (Mena-Valdés *et al.*, 2015). Se colocó el material vegetal en 200 mL de agua destilada caliente (83°C) durante 2 h. Transcurrido el tiempo, se filtró y se obtuvo la fase acuosa (extracto acuoso). Los encapsulados se obtuvieron mediante gelificación iónica por goteo sobre una solución de cloruro de calcio. Se tomaron los extractos acuosos (200 mL) y se mezclaron con alginato de sodio (5 g en 500 mL de agua destilada) hasta la completa disolución del alginato. Posteriormente esta mezcla fue goteada con la ayuda de pipetas de transferencia de 5 mL sobre una solución de cloruro de calcio (CaCl_2 ; 3 g en 500 mL de agua destilada) contenida en un vaso de precipitados (agitación magnética) ubicada a una distancia de 10 cm debajo del pico de la pipeta. Los encapsulados permanecieron 10 min en la solución de CaCl_2 , luego fueron filtrados y lavados con agua destilada, posteriormente se secaron y se transfirieron a un frasco limpio. El diámetro de los encapsulados fue determinado con un calibrador digital, determinando el promedio de diámetro de 20 capsulas.

Actividad antirradicalaria in vitro de los extractos

Ensayo del 1,1-difenil-2-picril-hidrazilo (DPPH•). El método de DPPH• se realizó de acuerdo con lo propuesto por Sulaiman *et al.*,

(2011). Para la elaboración de la curva de calibración se utilizó el antioxidante estándar ácido ascórbico (a.a) a concentraciones de 50-500 µg/mL. En placas de 96 pozos se adicionaron 50 µL de las concentraciones de a.a, posteriormente se agregaron 150 µL de la solución de DPPH• (0.3 mM) en todos los pocillos y se incubó la placa a temperatura ambiente durante 30 min en oscuridad. Transcurrido el tiempo la placa fue leída en un espectrofotómetro (Stat Fax 2100) a 545 nm, con las absorbancias obtenidas se obtuvo una gráfica y para la obtención de la ecuación de la recta se realizó un análisis de regresión en el programa estadístico Sigma Plot 11.0. Una vez determinados los parámetros de la curva de ácido ascórbico se determinaron los µg equivalentes de a.a/mL en las muestras, para ello se tomaron 50 µL de los extractos acuosos, y se realizó el método antes descrito, realizando las determinaciones por triplicado.

Análisis estadísticos

Los datos se expresaron como media $\pm$ desviación estándar. El análisis estadístico se realizó con el programa Sigma Plot 11.0. Las diferencias estadísticas se determinaron por el análisis de varianza ANOVA de una vía mediante comparación con la posprueba de Tukey ($p < 0.05$).

Resultados

Obtención de extractos y Preparación de encapsulados

Respecto al material vegetal utilizado, las hojas fueron: coloración verde, fresca y limpia; mientras que las flores fueron amarillas y sanas (Figura 1 A1-G1). Una vez obtenidos los extractos acuosos, se observó que estos presentaron diferentes tonalidades, el extracto de

J. spicigera presentó coloración purpura (Figura 1 A2); mientras que para los extractos de *E. globulus*, *A. ludoviciana* y *T. stans* las tonalidades presentadas fueron amarillas (Fig 1 D2, F2 y G2), ámbar para el extracto de *C. thevetioides* (Figura 1 B2) y finalmente incoloro para *K. daigremontiana* y *C. hadiensis* (Figura 1 C2 y E2).

La encapsulación es una técnica usada para el desarrollo de nuevos nutraceuticos y alimentos funcionales. Esta tecnología tiene como objetivos

principales proteger los compuestos activos de la degradación producida por el ambiente, liberar de manera controlada los compuestos activos desde la matriz encapsulante, enmascarar sabores desagradables, modificar las características físicas del material original y hacer más fácil su manipulación, por lo que su uso de esta técnica ha aumentado (Ortiz-Romero *et al.*, 2021). En la Figura 2 se muestran los encapsulados de alginato obtenidos mediante la utilización de la técnica de gelificación iónica. Se obtuvieron encapsulados húmedos que presentaron diferencias en coloración (Figura 2 A-G), que fueron relativamente iguales a las tonalidades presentadas por los extractos acuosos frescos (Figura 1 A2-G2). En cuanto al tamaño, presentaron diámetros promedios de 4.5 ± 0.54 , 4.52 ± 0.42 , 4.19 ± 0.54 , 4.79 ± 0.53 , 4.39 ± 0.62 mm para los encapsulados de *J. spicigera* (Figura 2 A1), *C. thevetioides* (Figura 2 B1), *K. daigremontiana* (Figura 2 C1), *E. globulus* (Figura 2 D1), *C. hadiensis* (Figura 2 E1) y *A. ludoviciana* (Figura 2 F1) respectivamente; mientras que los encapsulados obtenidos de *T. stans* (Figura 2 G1) fueron más grandes (5.02 ± 0.54 mm) en comparación con el resto de los encapsulados ($p < 0.001$) y con respecto a la forma, todas los encapsulados obtenidos presentaron forma esférica irregular (Figura 2).

Actividad antirradicalaria in vitro de los extractos

La actividad captadora de radicales libres o antirradicalaria se define como la capacidad de los componentes para reaccionar con los radicales libres (en una sola reacción de radicales libres) o por lo que para determinar esta actividad se utilizan radicales libres estables como el DPPH• o el ABTS•+ (Tirzitis y Bartosz, 2010). Evaluar esta actividad proporciona un indicativo de que los extractos pudieran presentar actividad antioxidante. En este sentido existe un interés en el empleo de fuentes de antioxidantes naturales, ya que los consumidores se inclinan por el uso de ingredientes naturales, provenientes, principalmente, de plantas medicinales. En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de los extractos acuosos de las plantas analizadas. Se

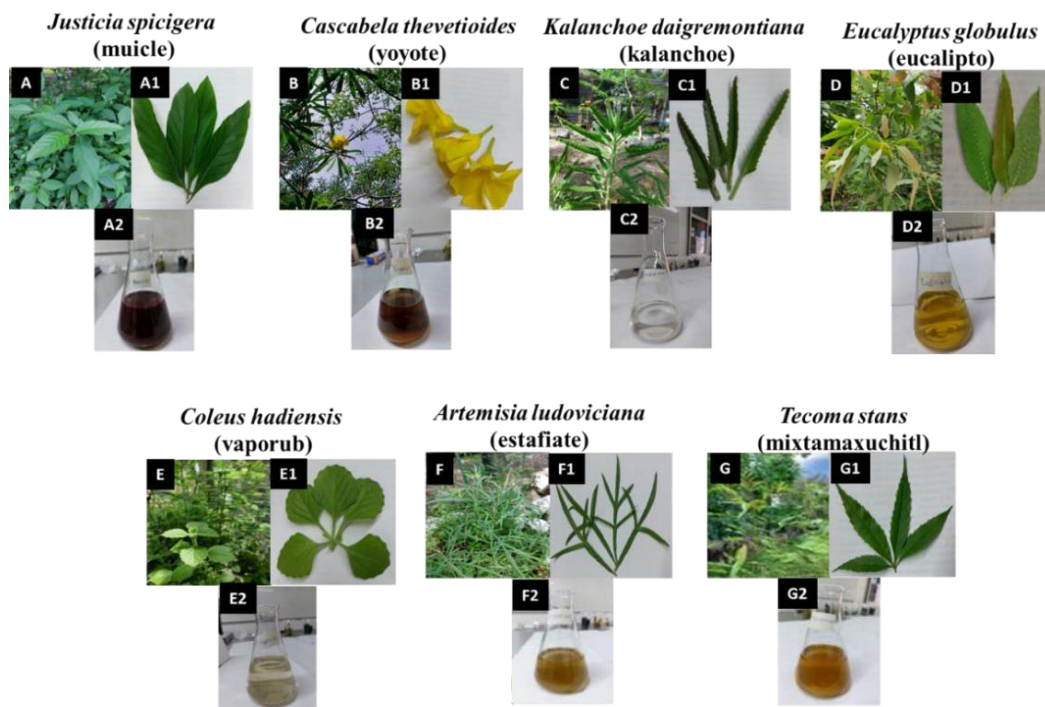


Figura 1. Fotografías de las plantas medicinales elegidas para la obtención de los extractos A-G) plantas del jardín botánico de la UAGro, hojas y flores colectadas A1-G1), extractos acuosos obtenidos de cada especie vegetal A2-G2)

determinó que la mayor capacidad captadora del radical libre DPPH• expresada como $\mu\text{g eq a.a/mL}$ de extracto, la presentaron los extracto de *K. daigremontiana*, *E. globulus*, *T. stans* y *C. hadiensis* ($p < 0.001$), mientras que fue poca para el extracto de *C. thevetioides* y nula para los extractos de *J. spicigera* y *A. ludoviciana*.

Discusión y conclusiones

En la medicina tradicional, las plantas con propiedades curativas juegan un papel muy importante para mantener la salud de la población. Por lo que se considera cada vez más importante revalorar el uso de las plantas medicinales e investigar de manera científica el conocimiento tradicional de la flora medicinal de las comunidades. En este trabajo, se seleccionaron las plantas *Justicia spicigera* (muicle), *Artemisia ludoviciana* (estafiate), *Kalanchoe daigremontiana* (kalanchoe), *Coleus hadiensis* (vaporub), *Eucalyptus globulus* (eucalipto) *Tecoma stans* (mixtamaxuchitl) y *Cascabela*

thetvioides (yoyote) que son utilizadas popularmente en la medicina tradicional del estado de Guerrero para aliviar la tos, fiebre, diarrea, dolores estomacales, hemorroides, dolor de muelas, infecciones urinarias, dolor de cabeza, conjuntivitis, vomito, gripa, infecciones de la piel, cáncer, diabetes, disentería entre otras (Juárez-Vázquez *et al.*, 2013; Barrera-Catalán *et al.*, 2015; Urióstegui-Flores, 2015; Mendoza-Maldonado *et al.*, 2020; Urióstegui-Flores y Villaseñor-Franco, 2021). Se obtuvieron los extractos acuosos de las plantas antes mencionadas, y se observó que estos presentaron coloraciones específicas. La diferencia en cuanto a tonalidades se debe a la presencia de pigmentos solubles que les confieren estas coloraciones, por ejemplo: las antocianinas proporcionan tonalidades rosas, azules y moradas, mientras que los flavonoides y algunos carotenoides otorgan coloraciones amarillas (Cartaya y Reynaldo, 2001; Puig *et al.*, 2018). Por otro lado, la ausencia de tonalidad se debe a que estos extractos no presentan compuestos solubles

Tabla 1.- Actividad antirradicalaria de los extractos acuosos de plantas medicinales de Guerrero.

Extracto acuoso	Actividad Antirradical DPPH• ($\mu\text{g eq a.a/mL de extracto}$)
<i>Justicia spicigera</i>	NP
<i>Artemisia ludoviciana</i>	NP
<i>Kalanchoe daigremontiana</i>	$5,771.14 \pm 10.06^a$
<i>Coleus hadiensis</i>	$3,383.08 \pm 10.15^d$
<i>Eucalyptus globulus</i>	$4,825.87 \pm 5.02^b$
<i>Tecoma stans</i>	$4,378.10 \pm 6.39^c$
<i>Cascabela thevetioides</i>	945.27 ± 7.5^e

Los valores representan el promedio $\pm$ desviación estándar (n=3). Letras diferentes indican diferencia estadística significativa (ANOVA, $p < 0.001$, posprueba de Tukey). NP: no presentó actividad.

en agua que les puedan proporcionar una coloración; sin embargo, pueden ser ricos en otros compuestos polares incoloros como la vitamina C (Babalola *et al.*, 2001). Algunos compuestos que les confieren coloración a los extractos se consideran funcionales como las antocianinas y los polifenoles por sus efectos benéficos para la salud debido a su capacidad antioxidante (Hasna, 2009). Por lo tanto, se busca proporcionales un valor agregado a estos extractos, y mediante la técnica de encapsulación por gelificación iónica se pueden obtener productos novedosos. Una vez que se obtuvieron las capsulas, se observó que estas aún conservaban las tonalidades de los extractos acuosos frescos, y en este sentido, la tonalidad púrpura que presentaron las capsulas obtenidas del extracto acuoso de *J. spicigera* se deben a la presencia de compuestos fenólicos como las antocianinas (Baqueiro-Peña y Guerrero-Beltrán 2017; Castro-Alatorre *et al.*, 2021); mientras que para los extractos acuosos de

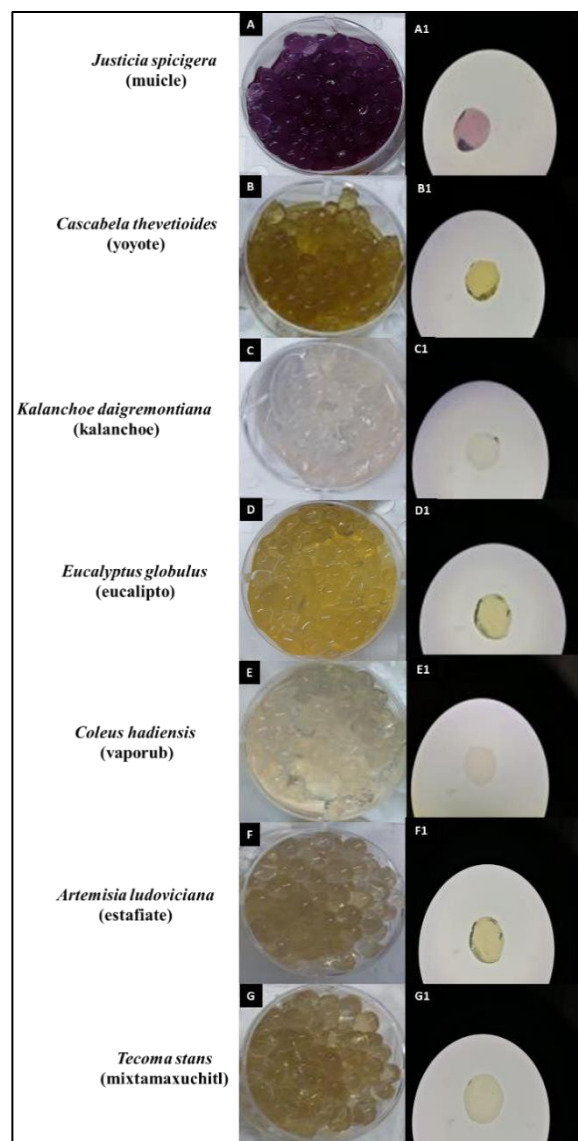


Figura 2. Imágenes de los encapsulados obtenidos de los extractos acuosos de *J. spicigera*, *C. thevetioides*, *K. daigremontiana*, *E. globulus*, *C. hadiensis*, *A. ludoviciana* y *T. stans* mediante gelificación iónica. (A-G) vista macroscópica de las capsulas (A1-G1) capsulas observadas en estereoscopio.

E. globulus y *T. stans*, las tonalidades amarillas se deban a la presencia de algunos flavonoides (rutina y quercetina), flavonas, flavonoles y algunos carotenoides (Cartaya y Reynaldo, 2001; Puig *et al.*, 2018). Aunque mediante la técnica de gelificación iónica se obtienen capsulas que

pueden oscilar entre 1000-10000 μm (1-10 mm); el tamaño y la esfericidad de los encapsulados obtenidos en este trabajo presentaron variaciones, y entre los factores que pueden afectar estos parámetros se encuentran la concentración de la solución de alginato de sodio, la solución gelificante (tipo de iones y concentración), tamaño del orificio de goteo (que es particularmente el más influyente), la distancia de caída de la gota, la velocidad de agitación, el tiempo de inmersión en la solución de cloruro de calcio, el pH y la cantidad del extracto (Salgado-Padilla, 2020).

Si bien, se ha logrado encapsular extractos acuosos mediante la técnica de gelificación iónica, se requiere que estos nuevos productos presenten una actividad biológica que les proporcionará una actividad nutracéutica, y la actividad antirradicalaria y antioxidante son de las más investigadas. Los resultados mostraron que los extractos de *K. daigremontiana*, *E. globulus*, *T. stans* y *C. hadiensis* presentaron la mejor capacidad antirradical DPPH•. La actividad captadora del radical DPPH• de extractos de *K. daigremontiana* ya ha sido evaluada, y Báez et al. (2021), determinaron que los extractos hidroalcohólicos (etanol y metanol) obtenidos de las partes aéreas de esta planta, presentaron un rango de actividad entre 3510- 4410 $\mu\text{g/mL}$, atribuyéndole esta actividad a la concentración de polifenoles (fenoles y flavonoides). Por otro lado, Martínez-Báez et al. (2016), determinaron que para *T. stans*, la actividad antirradicalaria contra el radical DPPH• presentó una CI_{50} de 29 $\mu\text{g/mL}$, posicionándola como una buena planta antioxidante. Por su parte para *E. globulus*, Bello et al. (2021), determinaron que el extracto etanólico desgrasado presentó actividad para inhibir el radical DPPH• a una concentración de 200 $\mu\text{g/mL}$, inhibiendo del 91-97% del radical.

Los resultados mostraron que los extractos acuosos de *K. daigremontiana*, *E. globulus*, *T. stans* y *C. hadiensis* contienen metabolitos que les proporcionan buena actividad captadora de radicales libres, lo que pudiera sugerir que poseen también buena actividad antioxidante. Se pudieron obtener mediante la técnica de gelificación iónica encapsulados que representan una nueva alternativa que ayudará a agregar un

valor a estas plantas utilizadas en la medicina tradicional en el estado de Guerrero para que se conviertan en una fuente promisorio de productos alimenticios saludables e innovadores para los sectores alimentario, farmacéutico y de cosméticos. Los resultados obtenidos confirman el potencial para usar los extractos acuosos de plantas guerrerenses; sin embargo, se requiere de investigaciones adicionales que permitan integrar otros datos científicos y proporcionar evidencia para el uso de estos extractos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al programa 9º Verano de Jóvenes en la Ciencia UAGro 2022, la beca otorgada a la estudiante Fabiola López Zenaído, que le permitió realizar una estancia de investigación en el Laboratorio de Toxicología y Salud Ambiental de la Facultad de Ciencias Químico-Biológicas. Proyecto 322334-Infraestructura-CONACYT 2023.

Referencias

- Babalola, S.O., Babalola, A.O., Aworth, O.C. (2001). Composition attributes of the calyces of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). The Journal of Food Technology in Africa, 6, 133-134. <http://hdl.handle.net/1807/3404>
- Báez, M., Torres, E.I., Gruszycki, A.E., Alba, D.A., Valenzuela, G.M., Gruszycki, M.R. (2021). Actividad antioxidante y antiinflamatoria en extractos hidroalcohólicos de *Kalanchoe daigremontiana* Raym-Hamet & H. Perrier. Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas, 50, 86-99. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v50n1.95450>
- Baqueiro-Peña, I., Guerrero-Beltrán, J.Á. (2017). Physicochemical and antioxidant characterization of *Justicia spicigera*. Journal of Food Chemistry, 218, 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.078>
- Barrera-Catalán, E., Herrera-Castro, N., Catalán-Heverástico, C., Ávila-Sánchez, P. (2015). Plantas medicinales del municipio de Tixtla de Guerrero, México. Revista Fitotecnia Mexicana, 3881, 109-111.

- Barrera, E. (1990). Estudio etnobotánico de plantas medicinales en la Estacada municipio de Tixtla, Guerrero. México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Universidad Autónoma de Guerrero. México, 135p.
- Bello, M.; Jiddah-kazeem, B.; Fatoki, T.H.; Ibukun, E.O.; Akinmoladun, A.C. Antioxidant Property of Eucalyptus Globulus Labill. Extracts and Inhibitory Activities on Carbohydrate Metabolizing Enzymes Related to Type-2 Diabetes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 36, 102111. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102111>
- Cartaya, O., Reynaldo, I. (2001). Flavonoides: características químicas y aplicaciones. *Cultivos Tropicales*, 22, 5-14. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215009001>
- Castro-Alatorre, N.C., Gallardo-Velázquez, T., Boyano-Orozco, L.C., Téllez-Medina, Meza-Márquez, O.G., Osorio-Revilla, G. (2021). Extraction and microencapsulation of bioactive compounds from muicle (*Justicia spicigera*) and their use in the formulation of functional foods. *Foods*, 10, 1747. <https://doi.org/10.3390/foods10081747>
- Guzmán-Maldonado, S.H., Díaz-Huacuz, R.S., González-Chavira, M.M. (2017). Plantas Medicinales: la realidad de una tradición ancestral. SAGARPA-INIFAP folleto informativo 1. ISBN:978-607-37-0856-2. https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_folletoinformativo/1044_4729_Plantas_medicinales_la_realidad_de_una_tradici%C3%B3n_ancestral.pdf
- Hasna, E.G. (2009). Polyphenols: food source, properties, and applications A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 2512-2518. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02077.x>
- Jasso-Gándara, S.N., Estrada-Castillón, E., Encina-Domínguez, J.A., Villareal-Quintanilla, J.A., Arévalo-Sierra, J.R. (2020). Plants used as medicinal in Guémez Tamaulipas, north-eastern Mexico. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48, 1130-1140. <https://doi.org/10.15835/nbha48311955>
- Juárez-Vázquez, M.C., Carranza-Álvarez, C., Alonso-Castro, A.J., González-Alcaraz, V.F., Bravo-Acevedo, E., Chamarro-Tinajero, F.J., Solano, E. (2013). Ethnobotany of medicinal plants used in Xalpatlahuac, Guerrero, México. *Journal of Ethnopharmacology*, 148, 521-527. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.04.048>
- Martínez, M. (1996). Las plantas medicinales de México. Editorial Botas, México, ISBN: 968-6334-07-6. 720p.
- Martínez-Báez, A.Z., Oranday-Cárdenas, A., Verde-Star, J., Arévalo-Niño, K., Ibarra-Salas, M.J., González-González, G.M., Rodríguez-Garza, R.G. (2016). Estudio preliminar sobre la actividad antioxidante y antibacteriana de los extractos metanólicos de *Azadirachta indica*, *Juglans regia*, *Tecoma stans* y *Magnolia grandiflora*. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 47, 36-44. <https://www.redalyc.org/pdf/579/57956610004.pdf>
- Mena-Valdés, L., Tamargo-Santos, B., Salas-Olivet, E., Plaza-Paredes, L.E., Blanco-Hernández, Y., Otero-González, A., Sierra-González, G. (2015). Determinación de saponinas y otros metabolitos secundarios en extractos acuosos de *Sapindus saponaria* L. (jaboncillo). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 20, 106-116. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962015000100010
- Mendoza-Maldonado, A., Silva-Aparicio, M., Castro-Ramírez, A.E. (2020). Etnobotánica medicinal de comunidades Nuu Savi de la montaña de Guerrero, México. *Etnobiología*, 18, 78-94.
- Neira-Carrillo, A., Yáñez-Muñoz, D., Aguirre-Zazzali, P., Amar-Marini, Y., Vidal-Vilches, S., Egaña-Palma, R. (2013). Encapsulación de biomoléculas usando polímeros naturales: “un nuevo enfoque en la entrega de fármacos en medicina”. *Avances en Ciencias Veterinarias*, 28, 31-40. <https://revistateoria.uchile.cl/index.php/ACV/article/view/30204/31978>
- OMS (2013). Estrategia de la OMS sobre la medicina tradicional 2014-2023. Organización Mundial de la Salud.

- https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/95008/9789243506098_spa.pdf
- Ortiz-Romero, N., Ochoa-Martínez, L.A., González-Herrera, S.M., Rutiaga-Quñones, O.M., Gallegos-Infante, J.A. (2021). Avances en las investigaciones sobre la encapsulación mediante gelación iónica: una revisión sistémica. *Tecnológicas*, 24, e1962.
<https://doi.org/10.22430/22565337.1962>
- Puig, C.G., Reigosa, M.J., Valentão, P., Andrade, P.B., Pedrol, N. (2018). Unravelling the bioherbicide potential of *Eucalyptus globulus* Labill. Biochemistry and effects of its aqueous extract. *PloSONE*, 13, 1-16.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192872>
- Salgado-Padilla, J.D. (2020). Una revisión de la microencapsulación de compuestos polifenólicos en la industria alimentaria y farmacéutica. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias Farmacéuticas, programa de Química Farmacéutica, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias D, T y C.
[Una revisión de la Microencapsulación de compuestos polifenólicos en la industria alimentaria y farmacéutica \(unicartagena.edu.co\)](https://doi.org/10.22430/22565337.1962)
- Sulaiman, S.F., Sajak, A.A.B., Ooi, K.L., Supriatno, S., Seow, E.M. (2011). Effect of solvents in extracting polyphenols and antioxidants of selected raw vegetables. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24, 506-515.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.01.020>
- Tirzitis, G., Bartosz, G. (2010). Determination of antiradical and antioxidant activity: basic principles and new insights. *Acta Biochimica Polonica*, 57, 139-42.
- Urióstegui-Flores, A., Villaseñor-Franco, A. (2021). Plantas medicinales empleadas en comunidades del Estado de Guerrero (México). *Revista de Salud Pública*, 23, 1-8.
[Plantas medicinales empleadas en comunidades del Estado de Guerrero \(México\) | Revista de Salud Pública \(unal.edu.co\)](https://doi.org/10.15446/rsap.v17n1.42235)
- Urióstegui-Flores, A. (2015). Hierbas medicinales utilizadas en la atención del sistema digestivo en la ciudad de Taxco, Guerrero. México. *Revista de Salud Pública*, 17, 85-96.
<https://doi.org/10.15446/rsap.v17n1.42235>
- Vitale, S., Colanero, S., Placidi, M., Di Emidio, G., Tatone, C., Amicarelli, F., D'Alessandro, A.M. (2022). Phytochemistry and biological activity of medicinal plants in wound healing: An overview of current research. *Molecules*, 27, 3566.