

RD-ICUAP

ISSN 2448-5829
Año 11, No. 32-2025



Año 11 No. 32 Mayo - Agosto 2025
Reserva No. 04-2021-092723014900-203
<http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap>
Difusión vía red de cómputo
RD-ICUAP Es una publicación del Instituto de Ciencias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

latindex



DIRECTORIO

Dra. Ma. Lilia Cedillo Ramírez
Rectora
Dr. Ygnacio Martínez Laguna
Vicerrector de Investigación y Estudios
de Posgrado
Dr. Jorge Rigoberto Juárez Posadas
Director del Instituto de Ciencias
Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega
Secretaría Académica ICUAP
Dra. María Guadalupe Hernández Linares
Secretaría de Investigación y Estudios
de Posgrado ICUAP
Dra. María del Rayo Santellán Olea
Coordinadora de Vinculación y
Responsabilidad Social ICUAP

Editores Responsables
Dr. Enrique González Vergara
M.C. Beatriz Espinosa Aquino

Editores Adjuntos
Dra. María Eugenia Castro Sánchez
Dra. Lidia Esmeralda García Díaz
Dra. B. Susana Soto Cruz
Dr. Eduardo Torres Ramírez

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Plácido Zaca Morán, Área de
Ciencias Exactas (BUAP)
Dra. Lourdes Millán Pérez Peña, Área de
Ciencias de la Salud (BUAP)
Dr. Joaquín Alvarado Pulido, Área de
Ingeniería y Tecnología (BUAP)
Dr. José Antonio Munive Hernández,
Área de Ciencias Naturales (BUAP)
XXXX, Área de Ciencias Sociales
(BUAP)

COMITÉ EDITORIAL EXTENDIDO

Dra. María Lilia Cedillo Ramírez (BUAP)
Dra. Claudia Fabiola Martínez de la
Peña (BUAP)
Dra. Margarita María de la Paz Arenas
Hernández (BUAP)
Dr. Miguel Ángel Méndez Rojas (UDLAP)
Dra. María del Carmen Durán
Domínguez (UNAM)

Dra. Maricela Bernal González (UNAM)

M. C. Rolando Salvador García Gómez
(UNAM)

Dra. Rebeca María López Rivas (UNAM)

Dr. Netzahualcóyotl Carlos Ramírez
(INAOE)

Dr. Jorge Alejandro Fernández Pérez
(BUAP)

Mtro. Enrique Edgardo Huitzil (FEBUAP)

DC Guadalupe Soto Rodríguez
(FMBUAP)

Mtro. Jesús Eladio Barrientos Mora
(FABUAP)

CORRECTORAS DE ESTILO LENGUA INGLESA

Mtra. Leticia Estudillo León

Mtra. Rocío Barbosa Trujillo

Mtra. Sara Merino Munive

Dra. Marisol Guzmán Cova

EQUIPO DE SOPORTE

Mtro. Felipe Coca Córdova (FABUAP)

Est. Enrique Martínez Luna (FABUAP)

Est. Mariana Cabrera Meneses (FABUAP)

Est. Alisson Alvarez Armenta (FABUAP)

RD-ICUAP

CINTILLO LEGAL

AÑO 11 No. 32

RD – ICUAP Año 11, No. 32, mayo-agosto de 2025, es una difusión periódica cuatrimestral editada por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con domicilio en 4 sur No. 104, Col Centro, C.P. 72000, difundida a través del Instituto de Ciencias BUAP, con domicilio en el edificio IC8, Ciudad Universitaria, Col. San Manuel, Puebla, Pue., C.P. 72570, tel. 01-22-222-95500 ext. 4170, <https://rdicuap.buap.mx>, editores responsables Dr. Enrique González Vergara enrique.gonzalez@correo.buap.mx y M. C. Beatriz Espinosa Aquino beatriz.espinosa@correo.buap.mx Reserva de derecho al uso exclusivo 04-2021-092723014900-203, ISSN 2448-5829 ambos otorgados por el Instituto Nacional del derecho de autor de la Secretaría de Cultura. Responsables de la última actualización de este número, Instituto Ciencias, Dr. Enrique González Vergara y M.C. Beatriz Espinosa Aquino, fecha de la última modificación, mayo de 2025

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

EDITORIAL

AÑO 11 NO. 32

Nos complace saludar nuevamente a nuestros seguidores y al público en general. Con entusiasmo, presentamos el número 32 de nuestra revista, correspondiente al undécimo año de publicación, reafirmando nuestro compromiso con la comunicación pública de los avances científicos.

El objetivo principal de esta publicación es divulgar las investigaciones recientes de las diversas disciplinas que se desarrollan tanto en el Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) como en otras instituciones universitarias hermanas. Nuestra presencia en el índice latinoamericano de revistas LATINDEX y en el Catálogo de Revistas Europeas de Divulgación Científica HIDDEN NATURE, fortalece nuestra visibilidad a nivel internacional.

Durante este año, continuaremos con la difusión de la ciencia a través de nuestro programa "RD-Divulga". En este espacio, conversaremos con investigadores invitados sobre temas de ciencia, tecnología y sociedad, compartiendo conocimientos y sus aplicaciones actuales para fomentar el interés en las áreas científicas.

Con la intención de ampliar nuestras actividades de divulgación, en 2025 convocamos al Concurso de Fotografía Científica que, como en la edición 2024, seguramente nos sorprenderán con su talento.

Así mismo, para comunicar la ciencia se invita al Taller de técnicas de radio y podcast para la divulgación científica en el mes de octubre.

El contenido de esta edición del Año 11 No. 32 en este número, está a su disposición 20 contribuciones, 17 son artículos, 2 notas técnicas y una nota.

Les recordamos que mantenemos abierta la comunicación a través del correo electrónico journalrd@viep.com.mx. También ofrecemos una sala de soporte todos los días hábiles de la semana en el horario indicado en la página de la revista, en el siguiente enlace de Google Meet: <https://meet.google.com/nua-rkhs-pch> Te invitamos también a consultar la página electrónica www.redica.buap.mx donde publicamos los eventos durante el año, como son el PROGRAMA RD-DIVULGA, los podcast en Spotify Compartiendo Ciencia, el Canal de YouTube JournalRd, el Facebook CCien Buap, en X @IcuapRd en BlueSky [journalrd.bsky.social](https://bsky.social/journalrd).

Agradecemos la portada de este número a la Dra. María Dolores Castañeda Antonio, quien presenta un mixomiceto de la región del Iztaccihuatl, observada a 40x en el microscopio de campo claro. Protista ameboides que se desarrollan en áreas húmedas y favorecen la descomposición de

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 32, 2025

RD-ICUAP

material orgánico ayudando al desarrollo de los bosques.

Agradecemos también el esfuerzo de los alumnos de la Facultad de Arquitectura: Martha Guadalupe Bravo Barragán, Victoria Ocaña Lozano, Sebastian Morelos Ayaquica, Alejandra Abigail Tejeda Flores y Alisson Alvarez Armenta por la maquetación de este número

Invitamos a toda la comunidad universitaria a enviar sus contribuciones para nuestro próximo número. La fecha límite para la recepción de manuscritos es el 5 de noviembre de 2025. Les pedimos estar pendientes de las actividades que hemos programado para el año en curso.

Agradecemos, como siempre, el apoyo de nuestras autoridades y el entusiasmo de nuestros autores, quienes hacen posible esta publicación.

Nos leemos en el siguiente número.

Enrique González Vergara

Editor responsable

Beatriz Espinosa Aquino

Editora responsable

ÍNDICE

AÑO 11 NO. 32

DIRECTORIO

EDITORIAL

- | | |
|---------|---|
| 9 - 19 | DEL LAGO AL AULA:
APROVECHAMIENTO DEL
LIRIO DE VALSEQUILLO PARA
PIZARRONES SOSTENIBLES |
| 20 - 29 | SUPERPARAMAGNETOS, LAS
NANOPARTÍCULAS APLICADAS
EN LA MEDICINA |
| 30 - 42 | BUENAS PRÁCTICAS DE UNA
FORMACIÓN CONTINUA
PARA LA GENERACIÓN DE
PROGRAMAS DE POSGRADO |
| 43 - 53 | CÚRCUMA (CÚRCUMA
LONGA): FUNDAMENTOS
QUÍMICOS, PROPIEDADES
BIOLÓGICAS Y APLICACIONES
EN LA MEDICINA MODERNA |
| 54 - 63 | LUPUS ERITMETASO SISTÉMICO
Y EMBARAZO: ACLARANDO
MITOS CON EVIDENCIA
MÉDICA |
| 64 - 71 | MIDA SUS PALABRAS,
JOVEN MATEMÁTICAS ENTRE
CUERVOS Y ESCRITORIOS |
| 72 - 82 | AGUA Y VEGETALES VEMOS,
PERO BACTERIAS, NO
SABEMOS |
| 83 - 96 | EJE INTESTINO-PULMÓN
COMO FACTOR DE
COMPLICACIÓN EN EL
COVID-19 |

- 97 - 111 EL COSTO ULTRAFINO DE URBANIZACIÓN: CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN PUEBLA Y LA CARRERA POR UN AIRE MÁS LIMPIO
- 112 - 122 HELICOBACTER PYLORI: ¿ALIADA O ADVERSARIA?
- 123 - 135 AGRICULTURA FAMILIAR COMO FORTALECIMIENTO AL SISTEMA AGROALIMENTARIO EN EL SUR DE TLAXCALA: ANTE LA PANDEMIA DEL COVID-19
- 136 - 154 LOS ANTIMICROBIANOS COMO ARMAMENTO CONTRA ENFERMEDADES INFECCIOSAS: ESTRUCTURA
- 155 - 164 CHERNÓBIL COMO UN LABORATORIO NATURAL: LA ECOLOGÍA DE UNA ZONA PROHIBIDA
- 165 - 175 EXTRACTOS DE PLANTAS: UN COMPENDIO DE MOLÉCULAS PARA LA MEJORA DE LA AGRICULTURA DEL PRESENTE Y DEL FUTURO
- 176 - 188 DIETA CETOGÉNICA: ¿UNA OPCIÓN SALUDABLE O SOLO UNA MODA?
- 189 - 207 LA PROGRAMACIÓN COMO HERRAMIENTA ESENCIAL PARA EL INGENIERO QUÍMICO DEL SIGLO XXI
- 208 - 232 REPERCUSIONES DE LA DIETA SOBRE LA MICROBIOTA INTESTINAL Y SU RELACIÓN CON EFECTOS EN LA SALUD, EQUILIBRIOS (EUBIOSIS) Y/O DESEQUILIBRIOS (DISBIOSIS). UNA BREVE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. PARTE 1 MICROBIOTA Y SISTEMA INMUNE EN RATAS WISTAR
- NOTA TECNICA
- 233 - 243 CARACTERÍSTICAS SOCIECONÓMICAS DE LA PRODUCCIÓN DE HABA EN LA REGIÓN NORORIENTAL DEL ESTADO DE PUEBLA, MÉXICO

244 - 251 DE LA BEBIDA ANCESTRAL
A DULCE NUTRITIVO:
ELABORACIÓN DE GOMITAS DE
PULQUE

NOTAS

252 - 259 DEGLUCIÓN ATÍPICA: UN
EFECTO DEL BIBERÓN

DEL LAGO AL AULA: APROVECHAMIENTO DEL LIRIO DE VALSEQUILLO PARA PIZARRONES SOSTENIBLES

FROM THE LAKE TO THE CLASSROOM:
HARNESSING THE VALSEQUILLO LILY FOR
SUSTAINABLE BLACKBOARDS

Flores-Estrada Claudia V.¹
Morales-González Lo-Rohami¹
Ruiz-Vallejo Karina M.¹
Sánchez-Sánchez Mariana¹
Castañeda-Antonio Ma. Dolores*²
Espinosa-Aquino Beatriz³

¹Licenciatura en Biotecnología, Facultad de Ciencias Biológicas, Ciudad Universitaria, Edif. EMA6, Col. San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Pue., México.

² Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas Instituto de Ciencias

³ Centro de Química Instituto de Ciencias Benemérita Universidad Autónoma de Puebla 24 sur y Av. San Claudio, Ciudad Universitaria C.P.72570, Puebla, Pue. México.

claudia.floreses@alumno.buap.mx,

lo.morales@alumno.buap.mx

karina.ruizva@alumno.buap.mx,

mariana.sanchezsa@alumno.buap.mx,

dolores.castaneda@correo.buap.mx*,

beatriz.espinosa@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0009-0611-2330>

<https://orcid.org/0009-0009-4594-4244>

<https://orcid.org/0009-0009-7095-2924>

<https://orcid.org/0009-0002-8125-168X>

<https://orcid.org/0000-0003-0350-3802>

<https://orcid.org/0000-0003-3509-1777>

Recepción: 19 junio 2025

Revisión 30 junio 2025

Publicación 30 Septiembre 2025

A11N75.25/991

Resumen

El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) es una planta invasora en México que, aunque tiene potencial para la biorremediación, su manejo inadecuado representa riesgos ecológicos, sociales y de salud pública. Este trabajo propone una alternativa sostenible para el aprovechamiento de esta planta mediante su transformación en pizarrones escolares. La metodología incluyó recolección, secado, trituración y moldeo del lirio, seguido de tratamientos estructurales con materiales accesibles como pegamento blanco, yeso y aceite de linaza. Se probaron distintos métodos de secado y acabado, evaluando su resistencia, viabilidad y seguridad. Este enfoque promueve un modelo de economía circular, disminuye la exposición a metales pesados bioacumulados por la planta y contribuye a la dotación de materiales didácticos en comunidades con recursos limitados. La investigación demuestra que es potencialmente factible utilizar el lirio acuático para crear productos útiles sin comprometer la salud humana, fomentando así una solución ambiental, educativa y socialmente responsable.

Palabras clave: *Eichhornia crassipes*, sustentabilidad, pizarrones, materiales didácticos, residuos.

Abstract

Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) is an invasive plant in Mexico, known for its bioaccumulation capacity and environmental impact when not properly managed. This study presents a sustainable alternative to repurpose this biomass into school blackboards. The methodology included collection, drying, grinding, and molding of the plant, followed by structural treatments using affordable materials such as white glue, gypsum, and linseed oil. Various drying techniques and finishing processes were tested to assess the strength, feasibility, and safety of the boards. The approach supports a circular economy model, reduces exposure to heavy metals accumulated by the plant, and addresses the shortage of educational materials in underserved communities. The findings confirm the viability of using *Eichhornia crassipes* to manufacture functional products without endangering human health, contributing to an environmentally and socially responsible solution.

Key Words: *Eichhornia crassipes*, sustainability, blackboards, educational materials, waste.

Introducción

El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) es una planta originaria del Amazonas que se ha extendido por cuerpos de agua de todo el mundo debido a su alta tasa de reproducción y adaptabilidad (Gutiérrez et al., 2001).

Adicional a eso, es una planta frecuentemente utilizada en investigación sobre biorremediación. En un estudio realizado por Miguel-Barrera et al. (2020), se evaluó la capacidad de esta planta para remover plomo (Pb) de cuerpos de agua contaminados. Los resultados indicaron que, en un periodo de 15 días, el lirio acuático incrementó su contenido de plomo en un 91.84%, pasando de 0.127 mg/kg a 0.284 mg/kg, lo que confirma su eficacia como bioacumulador de metales pesados. Esta característica lo convierte en una herramienta valiosa para la limpieza de ecosistemas acuáticos afectados por contaminantes industriales y urbanos, ofreciendo una solución ecológica y de bajo costo para mejorar la calidad del agua. Sin embargo, aunque puede ser una alternativa atractiva y muy usada, la falta de sistemas para su retiro y manejo posterior puede convertirlo en un problema a largo plazo.

En México, esta especie se considera invasora y ha generado serios problemas ecológicos, económicos y sociales. En la presa de Valsequillo, ubicada en el estado de Puebla, la proliferación del lirio acuático ha impactado negativamente la calidad del agua, la biodiversidad acuática y las actividades recreativas, agrícolas y pesqueras locales (CONAGUA, 2018).

Esta planta crece de forma acelerada en ambientes eutrofizados, ricos en nutrientes como nitrógeno y fósforo, los cuales son frecuentemente resultado del vertido de aguas residuales sin tratamiento adecuado. Su capacidad para formar densas coberturas sobre la superficie del agua impide el paso de la luz solar, disminuye el oxígeno disuelto y altera los ciclos naturales de los ecosistemas acuáticos (Martínez-Juárez et al., 2012).

Ante esta problemática, han surgido propuestas para utilizar el lirio acuático como materia prima para la elaboración

de fertilizantes orgánicos, aprovechando su alto contenido de nutrientes vegetales (González-Torres et al., 2020). Sin embargo, esta estrategia representa riesgos significativos. Diversos estudios han demostrado que el lirio acuático es una planta bioacumuladora, capaz de absorber y concentrar metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As) y mercurio (Hg) presentes en cuerpos de agua contaminados (Zarazúa et al., 2013).

El uso de este material contaminado como fertilizante puede conllevar la transferencia de estos metales al suelo agrícola y, eventualmente, a los cultivos y la cadena alimenticia, generando impactos negativos en la salud humana y el ambiente (Alloway, 2013).

El lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) ha sido evaluado en diversas ocasiones como sustrato alternativo para el cultivo, incluyendo también el cultivo de setas comestibles, específicamente *Pleurotus ostreatus*. En el estudio realizado por Castañeda-Antonio et al. (2016), se compararon dos tratamientos: uno con paja sola y otro con una mezcla de paja y lirio acuático. Ambos sustratos demostraron ser viables para el crecimiento de las setas; sin embargo, se detectó una translocación de metales pesados, siendo el arsénico el más preocupante, con concentraciones de 0.08 mg/kg en la paja sola y 0.155 mg/kg en la mezcla con lirio. Estos hallazgos resaltan la necesidad de evaluar la toxicidad del lirio acuático antes de su uso como sustrato, recomendando prestar especial atención a los niveles de arsénico presentes.

Por lo tanto, es necesario evaluar cuidadosamente los beneficios y riesgos del aprovechamiento del lirio acuático, especialmente en contextos donde la contaminación de los cuerpos de agua es significativa.

Para evitar este tipo de riesgos y promover un aprovechamiento más seguro, se ha propuesto el uso del lirio acuático como materia prima para la elaboración de pizarrones escolares por la no disponibilidad de metales en el material seco. Esta alternativa busca subsanar la falta de materiales didácticos en algunas escuelas, especialmente en zonas marginadas, al mismo tiempo que se da un uso construc-

tivo al lirio recolectado. Al encapsular la biomasa en compuestos sólidos que impidan el contacto directo con los usuarios, se puede aprovechar el recurso sin exponer a los niños ni al personal educativo a los metales pesados que esta planta pudiera contener. Esta propuesta representa un enfoque innovador, circular y sostenible que atiende tanto una necesidad ambiental como educativa.

Desarrollo Metodología para la elaboración de pizarras escolares a base de Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*)

Con el objetivo de aprovechar la biomasa del lirio acuático, se desarrolló un proceso experimental para elaborar prototipos de pizarras escolares. Este trabajo surge como respuesta a la proliferación del lirio en cuerpos de agua como la presa de Valsequillo, Puebla, y a la necesidad de materiales didácticos en comunidades con recursos limitados.

1. Recolección y secado del lirio acuático

La primera etapa consistió en la recolección manual del lirio acuático (Figura 1). La recolección se llevó a cabo con medidas de protección adecuadas para evitar algún riesgo durante la toma de muestras (lentes de protección, guantes, mascarilla) también se tomaron precauciones para evitar un posible golpe de calor.

El 14 de abril de 2025 se hizo la primera recolección de muestras de Lirio. Primero se pidió permiso para poder recolectar muestras de 3 puntos diferentes de la zona. Después se escogió el punto a recolectar, se hizo una descripción del punto (hora de recolección, coordenadas, temperatura ambiental, condiciones del suelo (Muy húmedo, húmedo y Parcialmente húmedo), condiciones de la planta, condiciones climáticas de la zona y el punto de recolección. Por último, se recogió la especie sin alterar o desaparecer la vegetación del punto, se guardó en una bolsa de plástico y se llevó a casa a secar a temperatura ambiente.

Muestra 1

Hora de recolección: 11:07 h
Coordenadas: 18.904994, -98.170274
Temperatura: 21°C
Suelo: Húmedo
Planta con raíz, sin flor y fresca.
Día soleado y sin nubes
Muestra recolectada a 0.50 m aproximadamente de la orilla del agua.

Muestra 2

Hora de recolección: 11:14 h
Coordenadas: 18.905543, -98.170303
Temperatura: 21°C
Suelo: Parcialmente húmedo
Planta con raíz, sin flor y semi fresca
Día soleado y sin nubes
Muestra recolectada a 2.0 m aproximadamente de la orilla del agua.

Muestra 3

Hora de recolección: 11:24 h
Coordenadas: 18.905533, -98.170339
Temperatura: 21°C
Suelo: Muy húmedo
Planta sin raíz, sin flor y fresca
Día soleado y sin nubes
Muestra recolectada a 1.30 m aproximadamente de la orilla del agua.



Figura 1. Recolección de Lirio en el Lago de Valsequillo. Elaboración Propia



Figura 2. Secado del Lirio a Temperatura Ambiente. Elaboración Propia

El mismo día se tomó una segunda muestra de un área diferente del Lago Valsequillo, donde se alternó la zona de recolección de las muestras en 3 puntos diferentes alejados de los 3 puntos de recolección anterior siguiendo los procedimientos anteriores se anotó la descripción de cada punto de recolección.



Figura 3. Segunda Recolección de Lirio en el Lago de Valsequillo. Elaboración Propia

Posteriormente, las plantas completas fueron sometidas a un proceso de secado natural a temperatura ambiente durante aproximadamente 15 días (Figura 2 y 4).



Figura 4. Secado de la segunda muestra del Lirio a Temperatura Ambiente. Elaboración Propia

Esta técnica es común para reducir la humedad sin degradar la estructura celular de la planta (Singh & Bishnoi, 2013). Luego, el material seco se cortó en fragmentos pequeños, eliminando la raíz de las plantas y se introdujo en una estufa de laboratorio a temperaturas controladas entre 35 y 40 °C durante varias horas, con el fin de eliminar la humedad residual. El secado térmico en ese rango de temperatura evita la descomposición de compuestos orgánicos y reduce el riesgo de proliferación microbiana (Kumar et al., 2020).

2. Trituración y elaboración de la pasta base

Una vez seco, el lirio fue triturado en un procesador de alimentos hasta obtener una harina vegetal fina. Esta harina se utilizó como base para formar una pasta, combinándola con harina de trigo, pegamento blanco (acetato de polivinilo) y agua tibia. La harina de trigo actúa como aglutinante natural por su contenido de gluten, mientras que el pegamento blanco mejora la cohesión y la adherencia del compuesto (García et al., 2017).



Figura 5. Moldeado de lirio. Elaboración Propia

3. Moldeo y secado de las piezas

La pasta resultante fue extendida con un rodillo para formar placas planas de diferentes grosores. Se probaron distintos métodos de secado: sobre superficies lisas al aire, dentro de bolsas plásticas con pequeñas aperturas, y al sol directo. Se observó que las piezas secadas en bolsas mostraron crecimiento de hongos, posiblemente debido a la humedad atrapada y la baja ventilación (Alam et al., 2022), mientras que aquellas expuestas al sol directo se curvaron y presentan agrietamiento por el secado rápido y desigual (Pathak et al., 2018).



Figura 6. Secado de las placas a sol directo.

Para alisarlas, se les aplicó vapor de agua sobrecalentado en las zonas curvadas, posteriormente se les aplicó presión aproximada de 5 kg (Figura 7).



Figura 7. Placas de Lirio tras su alzamiento. Elaboración Propia

El secado más eficiente se logró en un ambiente cálido (30-35 °C), sin exposición directa al sol ni fuentes de calor artificial, favoreciendo un secado gradual que evita deformaciones o fracturas (Figura 8).



Figura 8. Placa de Lirio secada al Sol que presenta una fractura muy grande en su estructura.

Además, se encontró que el grosor de las placas era un factor crítico: si eran demasiado delgadas, tendían a doblarse, mientras que, si eran muy gruesas, se rompían fácilmente al secarse, evitando una fragmentación que dejara inutilizable el producto. El grosor ideal fue el que permitió mantener rigidez sin comprometer la integridad estructural.

4. Acabados y tratamiento de los prototipos

Se desarrollaron dos procedimientos para evaluar la viabilidad de uso de los prototipos como pizarras. En el primero, las placas secas fueron impermeabilizadas con una mezcla de aceite de linaza y pegamento blanco (Figura 9). Este tratamiento sirve para sellar la superficie y evitar la absorción de humedad (Rodríguez et al., 2016). Luego, se aplicó una capa delgada de papel y engrudo, para proporcionar mayor firmeza, seguida de pintura y barniz para obtener una superficie utilizable como pizarra blanca.



Figura 9. Impermeabilización y refuerzo del lirio por el primer método. Elaboración Propia

En el segundo procedimiento, se utilizó yeso como refuerzo estructural, lo que aumentó la rigidez de las piezas. Se aplicó una mezcla de pinturas especializada que permitió el uso de gis, simulando la funcionalidad de una pizarra tradicional. Este enfoque busca integrar materiales de bajo costo, accesibles y no tóxicos, sin contacto directo con las fibras vegetales del lirio, lo cual minimiza el riesgo de exposición a metales pesados potencialmente acumulados por la planta en ambientes contaminados (Zarazúa et al., 2013; Alloway, 2013). En la Figura 10 se puede observar el acabado final de los pizarrones obtenidos, como puede verse, el prototipo puede verse estéticamente mejorado poniendo bordes de colores o dibujos que lo hacen visualmente más atractivo



Figura 10. Prototipo de pizarrones de lirio. Elaboración propia

Aprovechamiento de plantas para la elaboración de materiales

Actualmente, se están haciendo diversas investigaciones para la elaboración de productos de origen vegetal, siendo esto una alternativa sustentable y de bajo costo (Tabla 1).

[illegible]

Conclusiones

El uso del lirio acuático para la fabricación de productos útiles como lo son los pizarrones abre una oportunidad económica y ecológica para crear un nuevo mercado, dando una solución innovadora y sostenible con valor agregado a esta especie.

El uso de lirio acuático disminuye la población de este en cuerpos de agua controlando su reproducción y mitigando el impacto ambiental en los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, es importante evaluar la disponibilidad y factibilidad en la fabricación de estos productos para no alterar o dañar los ecosistemas acuáticos.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

A los docentes y asesores por el apoyo brindado durante la formación académica.

Referencias

- . Alam, A., Al-Rumaihi, A., Al-Ansari, T., & Baawain, M. S. (2022). Drying methods and their influence on biomass-based materials for bio-composite applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112136. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112136>
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Springer.
- Ayala, S. L. G., & Sanabria, F. L. Y. (2018). Aprovechamiento de recursos renovables en la obtención de nuevos materiales. *Ingenierías USBmed*, 9(1), 69-74. <https://doi.org/10.21500/20275846.3008>
- Castañeda, Antonio, M. D., Conde Reyes, A., Martínez Carrera, D., Portillo Reyes, R., Muñoz Rojas, J., Munguía Pérez, R., & Rivera Tapia, A. (2016). Viabilidad del uso de *Eichhornia crassipes* como sustrato de cultivo de setas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12371/17947>
- CONAGUA (2018). Informe de la calidad del agua en la presa de Valsequillo, Puebla. Comisión Nacional del Agua.
- García, J. D., Pérez, F. R., & Ruiz, C. M. (2017). Evaluación de adhesivos naturales y comerciales en compuestos aglutinados. *Revista Colombiana de Materiales*, 8(2), 25-33.
- González-Pérez, M. M., & Lomelí-Ramírez, M. G. (2024). CAPÍTULO 2 BIOPOLÍMEROS RENOVABLES: ALIADOS SOSTENIBLES DE LA ECONOMÍA CIRCULAR. *Innovación en biomateriales sustentables para un mundo mejor*, 41.
- González-Torres, L. R., López-López, M. A., & Martínez-Hernández, J. L. (2020). "Aprovechamiento del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) para la elaboración de compostaje como alternativa sustentable". *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 7(2), 45-52.
- Gutiérrez, E. L., Ruiz, E. E., Uribe, E., & Martínez, J. M. (2001). Biological control of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in Mexico. *Biocontrol News and Information*, 22(4), 99N-108N.

Kumar, A., Sharma, M. P., & Ghoshal, A. K. (2020). Drying of biomass for production of biofuels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109782>

Lema Vera, E. (2021). Bioplásticos a partir de residuos del cacao, una alternativa para mitigar la contaminación por plástico. *Ingeniería E Innovación*, 9(1). <https://doi.org/10.21897/rrii.2407>

Luna, P., & Lizarazo-Marriaga, J. M. (2022). Fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica. *MOMENTO*, 65, 65-79. <https://doi.org/10.15446/mo.n65.103151>

Martínez-Juárez, M., Hernández-Muñoz, P., & Castro-Pérez, M. (2012). "Impacto ecológico del lirio acuático en cuerpos de agua del centro de México". *Ecología Aplicada*, 11(2), 75–85.

Meneses, M. H. M., Agatón, L. L., Gutiérrez, L. F. M., Mendieta, L. E. G., & Botero, J. D. (2010). Aprovechamiento industrial de residuos de cosecha y poscosecha del plátano en el Departamento de Caldas. *Revista Educación En Ingeniería*, 5(9), 128-139. <https://doi.org/10.26507/rei.v5n9.14>

Miguel-Barrera, A., Castañeda-Antonio, D., Santamaría-Juárez, J. D., Munive-Hernández, J. A., Rivera-Tapia, A., & Ramos-Cassellis, M. E. (2020). Modelo de biorremediación de plomo con lirio acuático.

Morales Sánchez, V. A., Zuluaga-García, J. A., Aguirre Salazar, J. D., Aristizábal-Buitrago, D., & Ruiz Montilla, A. M. (2023). Biopolímeros y pectina: Una revisión con Tree of Science. *Interfaces*, 5(2). <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/interfaces/article/view/10727>

N, A. V., R, M. H., & Ramírez-Díaz, R. (2018). Evaluación de la adhesión de un pegante realizado con almidón nativo de yuca (*Manihot sculenta* Crantz) variedad M-Tai. *Revista de Investigación*, 11(1), 89-95. <https://doi.org/10.29097/2011-639x.181>

Pathak, S., Mandal, A., & Sharma, A. (2018). Moisture management in natural fibers and its effect on bio-composite performance. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19238–19243. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.269>

Perez, A. X. A., Salazar, J. S. V., Rea, A. M. J., & Jimenes, R. P. T. (2022). Materiales compuestos y su aplicación en partes automotrices: Revisión. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 7(9), 596-622.

Rodríguez, R., Salinas, A., & Vázquez, J. (2016). Recubrimientos impermeabilizantes: uso de aceites naturales y resinas como alternativas ecológicas. *Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sostenible*, 1(2), 45-53.

Singh, A., & Bishnoi, N. R. (2013). Comparative study of various drying techniques on *Eichhornia crassipes* for bioethanol production. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(6), 2037-2044.

Zarazúa, G., Ávila-Pérez, P., Tejeda, S., Barcelo-Quintal, I., & Martínez, T. (2013). Bioacumulación de metales pesados en lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en cuerpos de agua contaminados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 203-211.

"SUPERPARAMAGNETOS", LAS NANOPARTÍCULAS APLICADAS EN LA MEDICINA

"SUPERPARAMAGNETICS," NANOPARTICLES APPLIED IN MEDICINE

F. Franyutti-Villegas (1)*
Nery M. Aguilar (2)
U. Salazar-Kuri (1)

Instituto de Física "Luis Rivera Terrazas" (IFUAP), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. CP 72050, Puebla, Puebla, México.

Basque Center for MACROMOLECULAR DESIGN & ENGINEERING (POLYMAT), Universidad del País Vasco UPV/EHU, Donostia-San Sebastián, España.

*Autor de correspondencia: flaviofv@ifuap.buap.mx
nery.maguilar@polymat.eu
usalazar@ifuap.buap.mx

0009-0007-3411-518X
0000-0002-8463-2675
0000-0003-1748-3208

Resumen

El uso de nanopartículas magnéticas en el área médica promete revolucionar la forma en cómo se realizan ciertos tratamientos y procedimientos convencionales. La capacidad de sintetizar sistemas con diferentes propiedades abre un abanico de posibilidades para usos en distintos tratamientos que sean menos invasivos para los pacientes y que eliminen o disminuyan los efectos adversos de las técnicas más tradicionales. Este artículo de divulgación resume tan solo una pequeña parte de los estudios llevados a cabo por diversos grupos de científicos alrededor del mundo y más en concreto, las investigaciones realizadas en México en sistemas de nanopartículas superparamagnéticas.

Palabras clave: magnetismo, nanopartículas magnéticas, superparamagnetismo

Abstract

Using magnetic nanoparticles in the medical field promises to revolutionize certain conventional treatments and procedures. The ability to synthesize systems with different properties opens a range of possibilities for use in treatments that are less invasive for patients and that eliminate or reduce the adverse effects of more traditional techniques. This article summarizes only a tiny part of the studies conducted by various groups of scientists worldwide, specifically the research carried out in Mexico on superparamagnetic nanoparticle systems.

Keywords: magnetism, magnetic nanoparticles.

Actualmente, hemos escuchado el término “nanométrico” para hacer referencia a materiales u objetos con tamaños tan pequeños que son imperceptibles al ojo humano. Formalmente, los materiales nanométricos son aquellos donde alguna de sus dimensiones tiene un tamaño inferior o igual a 100 nm, que es el tamaño aproximado de algunos virus. Este particular tamaño, así como la naturaleza química del material, dotan a la nanoestructura de propiedades sobresalientes, tal y como mencionaron Gómez Muños y colaboradores en una de las ediciones anteriores de esta revista (Gómez-Muños, 2023). En esta ocasión, exploramos el comportamiento y aplicaciones de los materiales nanométricos que exhiben una de las propiedades físicas más interesantes. De hecho, esta propiedad es una de las más estudiadas y sobre todo aprovechadas. Se ha utilizado para diseñar dispositivos sofisticados como brújulas, sensores en tarjetas de crédito e incluso juguetes. Hablamos del magnetismo.

¿Qué es el magnetismo?

El magnetismo puede definirse como la fuerza de atracción o repulsión que ejerce un material sobre otro debido al movimiento de las cargas eléctricas microscópicas que se encuentran dentro de cada material (Lewis, R., & Lewis, R., 1981). Particularmente el magnetismo suele asociarse con los movimientos y propiedades intrínsecas de los electrones, como el espín. El espín del electrón es una de las propiedades más interesantes y complejas en la física cuántica, por lo que trataremos de describirlo utilizando la siguiente analogía.

Si imaginamos a esta partícula subatómica como una esfera, el espín sería similar, pero no igual, a representar el giro de la esfera sobre su propio eje. El espín produce una propiedad física conocida como momento angular, el cual, además de poseer una magnitud, también tiene una dirección. Es por ello por lo que la representación clásica de

un espín es una flecha apuntando a una dirección específica.

Debido a que se trata de una carga en movimiento, los electrones generan un campo magnético a su alrededor, de forma similar a lo que observó Oersted cuando descubrió que un circuito eléctrico induce un campo magnético. Por lo tanto, estas partículas subatómicas tienden a comportarse como pequeños imanes con dos polos, el norte y sur, opuestos entre sí, formando un dipolo magnético. Tanto la intensidad como la orientación de este dipolo magnético están dadas por un vector denominado momento magnético, el cual se anula cuando los electrones se encuentran apareados, es decir contiguos uno con otro, ya que existen dos pequeños imanes cercanos en direcciones opuestas, uno con vector hacia arriba y otro con vector hacia abajo.

En un material compuesto por átomos con electrones desapareados, los dipolos magnéticos con momentos magnéticos similares, o en la misma dirección, tienden a agruparse en regiones denominadas dominios magnéticos que se encuentran separadas unas de otras por barreras de dominio.

Sin la presencia de un campo magnético externo, los momentos magnéticos se encuentran distribuidos de forma aleatoria en todo el material. Sin embargo, cuando se aplica un campo magnético externo estos momentos se alinean, ya sea en la misma dirección del campo, o en contra, formando dominios magnéticos. Esta alineación es la que dotará de propiedades magnéticas a los materiales. Esto lo hemos observado todos al acercar un imán a tornillos o tuercas, materiales que por sí solos no atraen o repelen a los otros, pero al acercarlos un imán, estos se comportan como uno, es por ello que se les conoce como materiales paramagnéticos. Otros materiales ya cuentan con dominios magnéticos, aún sin la presencia de un campo magnético externo, a estos materiales se les conoce como ferro/ferrimagnetos.

El magnetismo a escala nanométrica

Cuando las dimensiones de un material

magnético comienzan a reducirse, los dominios magnéticos comienzan a agruparse, hasta llegar a un umbral donde forman un solo dominio. Si el tamaño decrece a tal punto de llegar a la escala nanométrica, los espines magnéticos se agrupan en un solo “macro espín” denominado monodominio. La existencia de este monodominio trae consigo la aparición del fenómeno llamado superparamagnetismo Figura 1.



Figura 1. Representación de diferentes propiedades magnéticas. En verde el lazo de histéresis típico de un material paramagnético; en este caso sus espines se encuentran completamente desorientados en ausencia de un campo magnético. En rojo, el ciclo de histéresis de un material ferromagnético. En estos materiales se observa la presencia de dominios. Por último, en azul, se observa el comportamiento de un material superparamagnético, debido este comportamiento a la existencia de monodominios.

El superparamagnetismo se distingue de otros fenómenos magnéticos por dos propiedades importantes: altas saturaciones y ausencia de coercitividad magnética. Esto implica que, por una parte, cuando el material está en presencia de un campo magnético externo, la mayoría de los dominios magnéticos presentes en el material se alinean en dirección a este campo, por lo que no es necesario utilizar campos magnéticos externos tan intensos para lograr la magnetización del material en comparación con otros materiales magnéticos. Por otra parte, la coercitividad hace referencia a la intensidad de campo magnético aplicado necesario para desordenar por completo los dominios magnéticos del material antes magnetizado, por lo que la ausencia de esta, indica que el material no queda imantado una vez retirado el campo externo. Debido a estas múltiples ventajas, actualmente se ha impulsado

el estudio de las nanopartículas que presentan superparamagnetismo con potenciales aplicaciones en diversos campos de investigación, particularmente en el área médica (Lindemann, A., Pries, R., et. al., 2015).

Nanopartículas magnéticas en la medicina

En la medicina, el magnetismo es comúnmente utilizado como herramienta para obtener imágenes médicas a través de técnicas no destructivas como la resonancia magnética. A esto se le conoce como imagenología de resonancia magnética (MRI por sus siglas en inglés). En esta técnica, los momentos magnéticos de los protones presentes en nuestro organismo, los cuales componen las moléculas de agua y algunos tejidos como los grasos, son orientados a favor de un fuerte campo magnético aplicado por el propio equipo. Posteriormente, el equipo aplica un pulso de radiofrecuencia que momentáneamente orienta a algunos vectores de momento magnético de forma contraria al campo. Al retirar dicho pulso, los espines liberan energía, es decir se “relajan” por medio de dos procesos que suceden al mismo tiempo. La relajación T1 es aquella en la que el protón vuelve a su estado original con la transferencia de energía del espín hacia la red, es decir se orienta completamente en la dirección previa al pulso de radiofrecuencia. En el caso de la relajación T2, la disipación de energía sucede entre los protones, es decir, se desorientan sin que implique una reorientación en otro plano, la liberación de energía es en todas direcciones donde haya protones como se observa en la figura 2, en la representación de las flechas rojas.

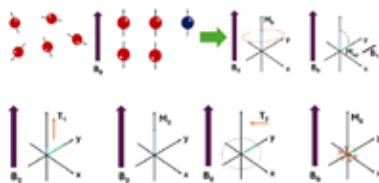


Figura 2. Representación esquemática de los principios básicos de MRI. Las esferas rojas repre-

sentan a los protones girando alrededor de su propio eje. Cuando se aplica un campo magnético externo (B0), los momentos magnéticos de los protones se alinean en dirección a este campo, en dos posibles posiciones, spin-up o spin-down. La suma de los protones se describe en un solo vector magnético M0 el cual puede moverse 90° al aplicarse un segundo campo magnético (B1).

Una vez eliminado este campo provoca que los protones vuelven a su anterior estado por medio de dos procesos de relajación: T1(espín-red) y T2 (espín-espín).

Los tiempos de relajación de los procesos T1 y T2 dependen principalmente del ambiente en el que se encuentran los protones. Por lo que los protones de las moléculas de agua y los de un tejido adiposo tendrán tiempos T1 y T2 diferentes. Esto genera que cada tipo de protón emita una señal característica que es traducida en diferentes “contrastes” dentro de la imagen. No obstante, cuando son necesarias imágenes médicas más a detalle, se suelen utilizar sustancias químicas denominadas “agentes de contraste”, las cuales, impactan en los tiempos de relajación de los protones modificando la intensidad de la señal obtenida. Comúnmente, estos agentes suelen ser compuestos basados en gadolinio (Gd). Sin embargo, estudios recientes han mostrado que la alta dosis, así como el uso frecuente de estos compuestos pueden generar la acumulación de Gd en tejidos óseos e incluso en el cerebro de los pacientes, ocasionando un daño severo en la salud. Una de las alternativas más atractivas para sustituir a estos agentes de contraste son las nanopartículas superparamagnéticas, que como se discutió en el apartado anterior, sus pequeñas dimensiones potencian su respuesta magnética, lo que se traduce en una disminución en la dosis y por lo tanto en menores efectos secundarios. En el Instituto de Física “Luis Rivera Terrazas” de la BUAP, nuestro grupo de investigación diseñó un sistema magnético-fluorescente con tamaño nanométrico que exhibe propiedades interesantes que podrían ser aprovechadas al ser utilizado como agente de contraste (Arteaga-Cardona, et. al., 2020). Las nanopartículas obtenidas, basadas en un núcleo magnético y una cubierta de tierras raras, pudieron ser rastreadas

dentro de células presentes en el sistema inmunológico de invertebrados (hemocitos), empleando dosis muy bajas (<40 ppm), sin causar alteraciones que pudieran inducir la muerte celular, Figura 3. Esto indica que el sistema presenta una baja toxicidad. Así mismo, el sistema nanométrico mostró tiempos de relajación T1 y T2 muy similares a los exhibidos por agentes de contraste comerciales, por lo que potencialmente podría ser utilizado para este fin.

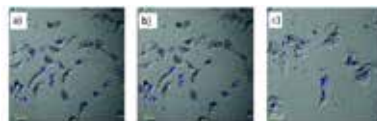


Figura 3. Emisión azul observada en las imágenes confocales de microscopio de; a) hemocitos con un material fluorescente de tierra raras, b) y c) hemocitos con el material magnético fluorescente preparado con 5 y 15 mL de solución de nanopartículas magnéticas, respectivamente. Imágenes obtenidas de Arteaga-Cardona, F., Estévez, J. O., Méndez-Rojas, M. A., Hidalgo-Tobón, S., Días-Suárez, P., Silva-González, N. R., ... & Salazar-Kuri, U., 2020.

Otra aplicación muy interesante de las nanopartículas magnéticas en la medicina es en el desarrollo de técnicas de detección oportuna de enfermedades. Por su naturaleza química, la superficie de estas nanoestructuras puede interactuar con ciertos grupos funcionales presentes en biomoléculas como proteínas e incluso segmentos de ADN. Esto permite que ciertas bacterias o virus presentes en fluidos fisiológicos de pacientes se adhieran superficialmente a las nanopartículas y puedan ser separados e identificados fácilmente.

Un ejemplo notable es el trabajo realizado por investigadores de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y la Universidad de Sonora (UNISON), en colaboración con los centros de investigación CIBIOR-IMSS, CIESA y el University of North Texas Health Science Center, quienes diseñaron un sistema de detección de la proteína NS1 del dengue utilizando nanopartículas magnéticas (Ramírez-Navarro, R., et. al., 2020). Estas nanoestructuras fueron recubiertas por un anticuerpo de la proteína NS1, que no es más que una proteína con las

características químicas necesarias para unirse específicamente a la proteína NS1 del virus del dengue. Por lo tanto cuando estas nanoestructuras funcionalizadas detectan la proteína se unen a esta formando un “conjugado”, el cual, reacciona con un tinte que detecta hierro en estado de oxidación 3+ (Fe^{3+}), ion que constituye la estructura química de las nanopartículas magnéticas, dando una coloración azul característica, Figura 4.

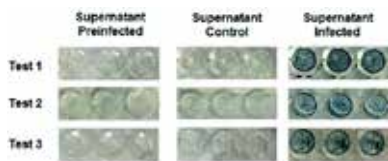


Figura 4. Prueba de detección de la proteína NS1 del virus del dengue, por triplicado. Se puede observar que la muestra control y la pre-infectada no muestran ninguna coloración, a diferencia de la muestra que contiene el virus. Imagen obtenida de la referencia Ramírez-Navarro, R., Polesnak, P., Reyes-Leyva, J., Haque, U., Vazquez-Chagoyán, J. C., Pedroza-Montero, M. R., ... & Angulo-Molina, A., 2020.

Con respecto a su uso en tratamientos contra el cáncer, las nanopartículas magnéticas han promovido al desarrollo de técnicas terapéuticas localizadas no invasivas que evitan el detrimento de la salud del paciente. Entre las técnicas más estudiadas se encuentra la hipertermia magnética. En la hipertermia magnética, un fluido biocompatible que contiene nanopartículas magnéticas (ferrofluido) se introduce al tumor del paciente. Posteriormente, un campo magnético alterno se aplica sobre el área del tumor generando la oscilación de las nanopartículas. Esto provocará un aumento en la temperatura capaz de eliminar a las células cancerosas y lo suficientemente localizado para evitar daño a tejidos sanos.

A lo largo de varias décadas se han realizado diversos estudios para conocer el potencial de esta técnica terapéutica. Los primeros usos de nanopartículas magnéticas para tratamientos de células cancerosas datan de 1951, siendo aplicadas en el tratamiento de ganglios linfáticos en perros (Gilchrist, R. K., et al., 1957). En el 2005, se llevaron a cabo estudios preclínicos en ratas para tratar

glioblastomas intracerebrales, donde se observaron mayores tasas de supervivencia en los ratones sometidos a este tipo de tratamientos (Jordan, A., et. al., 2006). En cuanto al estudio en humanos, las primeras pruebas clínicas de hipertermia magnética se realizaron en 2003, con un grupo de voluntarios que sufrían glioblastoma multiforme, una forma de tumor cerebral (Thiesen, B., & Jordan, A., 2008). Los resultados en estas pruebas clínicas fueron alentadores ya que los pacientes mostraron menos efectos secundarios y la reducción del tumor en un 90% en masa.

Gracias a todos estos resultados y a muchos más estudios previos realizados por diferentes grupos de investigación, fue posible el desarrollo del primer sistema comercial para hipertermia magnética conocido como MHF 300F. Este equipo, producido por MFH Hyperthermiesysteme GmbH Berlin, utiliza ferrofluidos basados en nanopartículas de óxido de hierro como agentes hipertérmicos (Gnevckow, U., et. al., 2004). Por lo tanto, una de las líneas de investigación más atractivas en este ámbito es en la obtención de ferrofluidos con baja concentración de nanopartículas magnéticas, excelente biocompatibilidad y una alta capacidad de calentamiento, con el objetivo de disminuir, aún más, los posibles efectos secundarios provocados por la presencia del ferrofluido en el cuerpo humano.

Recientemente investigadores del Centro de Química aplicada (CIQA), en Coahuila México, publicaron una novedosa investigación donde describen la obtención de nanopartículas superparamagnéticas con un tamaño inferior a 15 nm. Las nanoestructuras fueron probadas en una línea celular humana de fibroblastos mostrando una buena citocompatibilidad. Además, estas partículas calentaron a temperaturas (53 - 45 °C) que se encuentran dentro del rango aceptable para tratamiento médicos a bajas concentraciones (8-10 mg/mL), lo que las hace ideales para ser utilizadas en esta fascinante técnica (Rivera-Escobedo, et. al., 2024).

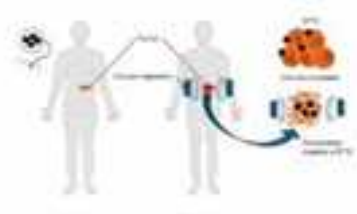


Figura 5. Representación del proceso terapéutico de hipertermia magnética. Un ferrofluido es inyectado en el paciente cerca de la zona donde se encuentra el tumor. La aplicación de un campo magnético alterno genera la oscilación de las nanopartículas, lo que provoca un aumento de temperatura localizado; este aumento genera la destrucción de las células tumorales.

Conclusiones

La investigación en torno al uso de nanomateriales magnéticos ha tenido, y seguirá teniendo, un impulso notable para

potenciales aplicaciones en diferentes áreas, siendo una de las más atractivas el área médica. La versatilidad química de estos materiales permite obtener sistemas nanométricos con interesantes características, además de las propiedades magnéticas, que pueden ser aprovechadas para diversos fines. Es un hecho que aún falta realizar más investigaciones para que la aplicación de materiales nanométricos magnéticos en la medicina sea una realidad. Sin embargo; hasta ahora, el trabajo realizado alrededor del mundo, y desde luego en México, por distintos grupos ha demostrado que el estudio de estos materiales brinda oportunidades únicas de tratamientos y estudios médicos menos invasivos y con menores o nulos efectos secundarios. En las manos de nuestra comunidad científica queda mantener el interés y continuar el estudio referente a estos fascinantes materiales.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Agradecimientos

F. Franyutti-Villegas agradece al CONAHCYT por la beca de doctorado número 1075935.

Referencias

- Arteaga-Cardona, F., Estévez, J. O., Méndez-Rojas, M. A., Hidalgo-Tobón, S., Dies-Suarez, P., Silva-González, N. R., ... & Salazar-Kuri, U. (2020). Fabrication of a multifunctional magnetic-fluorescent material for medical applications. *Dalton Transactions*, 49(14), 4376-4389.
- Gilchrist, R. K., Medal, R., Shorey, W. D., Hanselman, R. C., Parrott, J. C., & Taylor, C. B. (1957). Selective inductive heating of lymph nodes. *Annals of surgery*, 146(4), 596-606.
- Gneveckow, U., Jordan, A., Scholz, R., Brüß, V., Waldöfner, N., Rieke, J., ... & Wust, P. (2004). Description and characterization of the novel hyperthermia-and thermoablation-system for clinical magnetic fluid hyperthermia. *Medical physics*, 31(6), 1444-1451.
- Gomez-Muñoz, C. L., Zaca-Morán, P., & Zaca-Moran, O. (2023). LOS NANOMATERIALES Y SU IMPORTANCIA EN LA SÍNTESIS AMIGABLE CON EL AMBIENTE. *RD-ICUAP*, 162-170.
- Jordan, A., Scholz, R., Maier-Hauff, K., van Landeghem, F. K., Waldoefner, N., Teichgraeber, U., ... & Felix, R. (2006). The effect of thermotherapy using magnetic nanoparticles on rat malignant glioma. *Journal of neuro-oncology*, 78, 7-14.
- Lewis, R., & Lewis, R. (1981). *Magnetism. Electronics Servicing: Part 1 Radio, Television and Electronics Theory City and Guilds of London Institute Course 224*, 55-76.
- Lindemann, A., Pries, R., Lüdtke-Buzug, K., & Wollenberg, B. (2015). Biological properties of superparamagnetic iron oxide nanoparticles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(2), 1-4.
- Ramírez-Navarro, R., Polesnak, P., Reyes-Leyva, J., Haque, U., Vazquez-Chagoyán, J. C., Pedroza-Montero, M. R., ... & Angulo-Molina, A. (2020). A magnetic immunoconjugate nanoplatfrom for easy colorimetric detection of the NS1 protein of dengue virus in infected serum. *Nanoscale Advances*, 2(7), 3017-3026.

Rivera-Escobedo, L. A., Sánchez-Orozco, J. L., Meléndez-Ortiz, H. I., Betancourt-Galindo, R., Cortés-Hernández, D. A., & García-Cerda, L. A. (2024). Non-toxic HfxFe₃-xO₄ nanoparticles for magnetic hyperthermia applications. *Materials Letters*, 373, 137141.

Thiesen, B., & Jordan, A. (2008). Clinical applications of magnetic nanoparticles for hyperthermia. *International journal of hyperthermia*, 24(6), 467-474

PRÁCTICAS DE FORMACIÓN CONTINUA PARA LA GENERACIÓN DE PROGRAMAS DE POSGRADO

PRACTICES IN CONTINUING EDUCATION FOR THE GENERATION OF POSTGRADUATE PROGRAMS

María Teresa Machado Durán (1),
José Manuel Víctor Vallejo Córdoba
(2) *,
José Aurelio Cruz de los Ángeles (3),
Alfredo Pérez Paredes (4)

Centro de sistematización de información
Facultad de Administración
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Río Verde 6144, Colonia San Manuel, Puebla, Pue. CP. 72570

Recibido: 20 febrero 2025

Revisado: 30 junio 2025

Publicado: 30 de agosto 2025

*Autor de correspondencia: victor.vallejo@correo.buap.mx
teresa.machado@correo.buap.mx
joseaurelio.cruz@correo.buap.mx
alfredo.perez@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3933-2729>

<https://orcid.org/0000-0003-2224-4850>

<https://orcid.org/0000-0002-8682-366X>

<https://orcid.org/0000-0001-8766-5766>

Resumen

Esta publicación está dirigida directivos y docentes interesados en desarrollar a través de la formación continua un sistema de acciones intensivas, para la elaboración y desarrollo de propuestas de posgrados colectivos, especialidades, maestrías y doctorados con las exigencias globales y singulares de la universidad del siglo XXI. Esta experiencia ha sido aplicada en la Facultad de Administración de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Se espera que esta experiencia sea replicada en otras unidades académicas de la casa de altos estudios, inclusive, en otras universidades. La socialización de la experiencia en la Facultad como referencia.

Palabras clave: perfeccionamiento, formación profesional superior, posgrado.

Abstract

This publication is aimed at administrators and teachers interested in developing, through continuing education. It is a system of intensive actions for the creation and development of collective postgraduate programs, specializations, master's degrees, and doctorates that meet the global and unique demands of 21st-century universities. This experience has been applied in the Faculty of Administration at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. It is hoped that this experience will be replicated in other academic units of the institution, including other universities. The socialization of this experience in the Faculty as a reference.

Keywords: improvement, higher professional education, postgraduate studies.

Introducción

La formación continua de los docentes para la elaboración de programas de posgrado de alto impacto constituye un pilar esencial en la mejora de la calidad educativa y empoderamiento de sus competencias en la enseñanza superior, lo cual se encuentra ampliamente demostrado en la literatura acreditada, por su parte, la socialización de experiencias exitosas de formación continua no solo favorece el intercambio de conocimientos, sino que también genera un impacto social representativo en el resto de la comunidad educativa, pues como se sabe, comunicar públicamente los resultados y aprendizajes obtenidos permite que dichas experiencias no queden encapsuladas dentro de una única institución, sino que puedan nutrir a otras áreas de conocimiento y contextos universitarios, lo cual favorece la perspectiva transdisciplinaria de dicho intercambio y el trabajo integral y colaborativo que demanda la sociedad del siglo XXI.

A pesar de su importancia, no siempre los colectivos docentes de Facultad de Administración, cuentan con una masa crítica homogénea en cuanto a su expertise en el diseño curricular de planes y programas de posgrado, con una visión global y regional de las prioridades educativas encargadas por la sociedad a la universidad, con dominio del proceso científico productivo individual que debe articular con el diseño de los programas antes referidos para formar parte de la planta docente que genera y luego participa de la gestión de dichos programas. Este desafío ha sido asumido por la dirección de la Facultad de Administración de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con un sistema de acciones de formación continua de los docentes, de las cuales aquí se exhiben como resultado de esta buena práctica la teoría y metodología asumida para la capacitación inicial, es decir, propedéutica, de lo que es un proyecto más amplio y en construcción participativa que está favoreciendo el desarrollo de colectivos pedagógicos más conectados, resilientes, colaborativos, transdisciplinarios e inclusivos.

La difusión de estas experiencias a través de publicaciones académicas, conferencias y otros medios de divulgación permite que los beneficios obtenidos de la formación docente en programas de posgrado trasciendan los límites institucionales, impactando no solo en los docentes involucrados, sino también, en la sociedad en general. Esta comunicación fomenta una cultura de colaboración y aprendizaje continuo, donde los docentes se ven como receptores de conocimiento y también como agentes activos en la construcción de un sistema educativo más equitativo y adaptado a las necesidades del siglo XXI.



Figura 1. Experiencias educativas en los niveles superiores. <https://boletin.buap.mx/node/2007>

Desarrollo

Se ha considerado como criterio central en la planeación de la experiencia la formación de los docentes para la generación de programas de posgrado que, como uno de los desafíos clave en la educación del siglo XXI se ha procurado alinear con las demandas sociales, tecnológicas y económicas actuales. Esto requiere la formación de docentes capaces de transformar las instituciones educativas en función de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con especial énfasis en el ODS 4: Educación de Calidad (ONU, 2015), asimismo, se han considerado los criterios de la ANUIES (2024) en cuanto a la relevancia del liderazgo educativo para guiar a las instituciones a través de procesos de cambio e innovación. No menos importante han sido las políticas de la Nueva Escuela Mexicana (SEP, 2023) enfocadas a la atención del rezago escolar, así como el Plan de Desarrollo Institucional de la

BUAP 2021-2025 particularmente en su perspectiva relacionada con la gestión del talento humano que permite la eficiencia en los procesos en el marco del Sistema Integral de Información Académica y Administrativa (BUAP, 2021, p. 25).

Ocupan lugar de privilegio desde el punto de vista epistémico los criterios de destacados teóricos contemporáneos como Fullan (2020) acerca del liderazgo de los docentes como agentes de cambio con una alta capacidad para ejercer una influencia positiva en la cultura organizacional y generar un compromiso en la comunidad educativa. Los puntos de vista de Hargreaves y Fink (2008) acerca de la innovación en los centros educativos, así como las aportaciones de Tobón (2007) en cuanto a la formación de competencias y los criterios de Díaz Barriga citado por Ricalde (2024) así como los criterios de la Comisión Nacional para la Mejora Continua de la Educación (2020) en cuanto al diseño curricular en particular y la transformación educacional en general, para que tengan lugar dichas innovaciones programáticas.

I. Se abrió la participación a todos los docentes, lo cual imprimió un alto nivel de heterogeneidad al universo con el cual se trabajó.

II. Se realizó un diagnóstico para la identificación de áreas del conocimiento de los docentes, producción científica relacionada con dicha área, fortalezas y debilidades.

III. Se definieron las fortalezas que permitían identificar los grupos oferentes a formar.

IV. Se identificaron las debilidades que determinaron los apoyos estratégicos a ofrecer de manera individual a los docentes, en función de alcanzar la zona de desarrollo deseada.

V. Se establecieron las metas a alcanzar en el período. Como se ha dicho antes, el período para el cual se diseñó esta experiencia tuvo un carácter propedéutico.

VI. Se diseñaron talleres iniciales a los grupos oferentes organizados por área del conocimiento, estos talleres decrea-

ción y las actividades diseñadas para ellos, se constituyeron en un estilo de trabajo en la dirección de los grupos, lo cual permitió optimizar el proceso inicial.

Esta experiencia inicial forma parte de un sistema más amplio en el que, una vez concluido el ciclo propedéutico, los grupos ingresan a una forma más compleja de formación continua que se concreta a través de un Diplomado. Cabe mencionar que, en la conducción del Diplomado participan expertos, asesores y directivos de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la BUAP donde tiene lugar la generación tácita de los programas de posgrado, como parte de una segunda etapa que no es objetivo de este artículo abarcar.

De manera que, el artículo centra su atención en el sistema de talleres que, en calidad de ciclo propedéutico inicial, permitió hacer detonar acciones de organización, planeación y generación de propuestas de programas de posgrado a los grupos oferentes de la Facultad de Administración de la BUAP durante el periodo escolar de otoño 2024.



Figura 2. Centro de vinculación profesional. Facultad de Derecho Ciudad Universitaria BUAP. https://www.facebook.com/profile.php?id=100063726801408&__tn__=UC*f

Premisas al elaborar los talleres de nivelación de los grupos oferentes en diferentes áreas del conocimiento

Para establecer las premisas que guiaron a los talleres de creación se consideró el enfoque transformador y sostenible del liderazgo que ejercen los docentes,

basado en la innovación y la resiliencia, en este sentido, se asumen los postulados del Instituto Internacional de Planeamiento de la Educación (IIPE) de la UNESCO (2017) en cuanto a que los docentes, en este caso, diseñadores curriculares del cuarto nivel, no solo aborden competencias técnicas, sino que también asuman una comprensión crítica de los desafíos y oportunidades en la educación actual.

La transdisciplina, encontró un terreno fértil en la propuesta que a través de la socialización de estas experiencias de formación continua de los docentes pretende ampliar las posibilidades de conectar diversas áreas del saber, al tiempo que fomenta un intercambio crítico y constructivo de esta práctica formativa que, no solo involucra la colaboración entre disciplinas, sino que también impulsa la creación de nuevas formas de pensamiento capaces de responder a los desafíos contemporáneos, lo cual es especialmente relevante en el diseño y gestión de programas de posgrado.

En este sentido, se asumieron dentro de las premisas consideradas vanguardistas, a la luz de los desafíos propios del país, las necesidades de los docentes las cuales se expresaron del siguiente modo:

1. COMPETENCIAS DOCENTES

Las competencias docentes en calidad de sistema de saberes instruccionales, procedimentales y actitudinales de los docentes, cada vez más crecientes ante el reto de la sociedad global, exigen tal como hace notar Rodríguez-García y Martínez-Heredia, (2019) que el docente no solo sea un experto en las materias que imparte, sino que también desarrolle una amplia capacidad de adaptación al desarrollo científico tecnológico que imponen las nuevas realidades educativas y desarrollen competencias que les permitan adaptarse a las nuevas realidades educativas, "este tipo de conocimiento tiene que ver con el dominio, por parte del profesor, de los paradigmas de investigación en cada disciplina, el conocimiento en relación con cuestiones como la validez, tendencias y perspectivas en el campo de la especialidad" (2019, p. 28). En México, implementar un sistema

de capacitación docente basado en competencias asegurará que los profesores estén preparados para enfrentar los retos del aula del siglo XXI, promoviendo una enseñanza más dinámica y adaptable.



Figura 3. Académicos. <https://boletin.buap.mx/node/1697>.

2. INTEGRACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DIGITALES Y EDUCACIÓN A DISTANCIA

Es importante destacar que, a escala mundial, la educación superior ha adoptado modelos de educación híbrida y completamente en línea. Esto requiere que los docentes estén familiarizados con herramientas tecnológicas y plataformas de educación a distancia, al tiempo que posean conocimientos sobre la modalidad del curso a diseñar y el rendimiento académico, ampliamente desarrollados en la obra de Chacón Cuberos et al. (2024). Esto implica, desde el punto de vista del desarrollo de las competencias docentes, poner en práctica los desempeños demostrables de los docentes para emplear de manera creativa las plataformas, herramientas digitales 4.0, y técnicas de gamificación en su combinación con las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC). En este sentido, y de acuerdo con lo antes dicho, se deben aprovechar para hacer crecer las competencias docentes, tanto los formatos presenciales, híbridos y virtuales.

3. INCLUSIÓN Y EQUIDAD

Las políticas educativas mexicanas, en consonancia con las tendencias globales, algunas de las cuales han sido ampliamente desarrolladas por la UNESCO (2017), buscan establecer una educación que comprenda la inclusión como una perspectiva en la que México

tiene mucho que mostrar en relación con la necesidad de una mirada a sus diversas etnias, el tratamiento de las mujeres y niñas, así como de los grupos vulnerables que padecen desventajas económicas y sociales González Peña & Gomes Soares (2020)

confluyen diversas contribuciones y corrientes teóricas. Está apoyada en una filosofía de la praxis educacional entendida como un proceso político-pedagógico centrado en el ser humano como sujeto histórico transformador, que se constituye socialmente en las relaciones con los otros seres humanos y con el mundo (2020, p. 678).

De tal suerte, se constituye en un imperativo dentro de la preparación de los docentes, sus competencias para diseñar propuestas y poner en práctica, estrategias pedagógicas inclusivas que favorezcan la equidad y la igualdad de oportunidades.

4. LIDERAZGO PEDAGÓGICO TRANSFORMACIONAL Y TRASCENDENTE

Este principio, para la propuesta que se analiza, presupuesto, forma parte de las tendencias globales ampliamente desarrolladas por autores como Fullan (2020) y viene a subrayar el imperativo de que los docentes deben ser inspiración, motivación e impulso no reducible al contexto áulico, sino trascendente a la comunidad y a la actuación de los estudiantes inclusive en contextos extraescolares. El sistema de acciones que se activa en esta experiencia práctica se centra en promover este tipo de liderazgo, dado que los docentes implicados tienen la capacidad de contribuir de manera significativa al mejoramiento institucional mediante la innovación en el diseño programático de figuras de posgrado y el cambio desde el aula. Esto contribuye al fortalecimiento de las comunidades académicas y facilita la transformación educativa.



Figura 4. Liderazgo BUAP. <https://www.boletin.buap.mx/node/698>

5. EL APRENDIZAJE BASADO EN LA EXPERIENCIA Y LA INVESTIGACIÓN

Se trata de sistematizar, profundizar a través de la investigación y promover la cultura de la nación, esa es, al decir de Álvarez de Zayas (1999), la función fundamental de la universidad, como institución cultural más importante de una nación. Según hace notar Schleicher (2018) una de las perspectivas significativas de universidad contemporánea se relaciona con la gestión del conocimiento y las aperturas metodológicas a que la investigación-acción y otras metodologías de investigación den paso al ejercicio del criterio, la socialización de resultados en una dialéctica que permita la mejora continua.

6. FORMACIÓN SITUADA O CONTEXTUALIZADA

La diversidad, la identidad, la otredad, son categorías inherentes a la diversidad cultural, socioeconómica y geográfica de un país plural como México, como lo destaca Órnelas (2020). Es importante que las propuestas educativas incluyan las características propias de la nación y las políticas educativas adecuadas. También se debe tener en cuenta el aprendizaje por servicio, que permite conectar lo social con lo pedagógico. Esto implica la participación activa de los estudiantes y un buen liderazgo docente, con el objetivo de educar para la ciudadanía desde las instituciones. Así, lo académico se relaciona estrechamente con la teoría, la práctica y el compromiso con el bien común (González Peña et al., 2021, p. 4).

Talleres. Objetivos y contenidos

Taller 1: Prioridades a atender en la generación de programas de posgrado.

Objetivo. Develar las prioridades internacionales, nacionales y locales que debe atender la universidad

Algoritmo de trabajo aplicado en el Taller 1.

- Precisar la orientación de los programas en sus dos salidas fundamentales, esto es: la generación de investigaciones de vanguardia o en la vertiente que apunta al desarrollo de competencias y se maneja como profesionalizante.

- Develar en las propuestas el compromiso hacia la investigación abierta y comprometida, la respuesta a los problemas sociales desde una perspectiva holística y en particular la calidad de los recursos humanos intervinientes.

- La triangulación en su aspecto teórico, metodológico y entre investigadores para diagnosticar la productividad de los docentes en investigación e innovación y su articulación con dichas prioridades.



Figura 5. Triangulación de los componentes que entran en el proceso de diagnóstico. Elaboración propia



Figura 6. La productividad académica en sus aspectos de verificación objetiva. Elaboración propia.



Figura 7. La productividad académica de los docentes como eje articulador del Programa. Elaboración propia

Taller 2: Líneas de generación del conocimiento

Objetivo: Saber definir líneas de generación de conocimiento en su articulación con las temáticas

Algoritmo de trabajo aplicado en el Taller II.

- Revisión de los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) del CONAH-CYT.



Figura 8. Programas Nacionales Estratégicos del CONAHCYT (2023a).

I. Primer nivel de triangulación se plantea entre:

- Programas Nacionales Estratégicos (CONAHCYT, 2023).

- Los Lineamientos del Sistema Nacional de Posgrados (SNP), aprobados por la Junta de Gobierno del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT, 2023b).

- Prioridades de la BUAP expresadas en su Plan de Desarrollo Institucional 2021-2025 (BUAP, 2021).

II. Segundo nivel de triangulación. ¿Qué otras respuestas a esas prioridades existen en el territorio, la nación, otros niveles?

III. Tercer nivel de triangulación. ¿Cómo la producción actual del Grupo Oferente se relaciona con las líneas definidas?

IV. Llegar en un primer acercamiento a las Líneas de Generación y/o Aplicación del Conocimiento (LGAC).

V. Respaldo el contenido de la línea con teoría acreditada. Se sugiere trabajar con la diada objeto/campo que a continuación se explica en la figura 4 en su articulación con las prioridades identificadas.

VI. Llegar con alto nivel de esencialidad a la definición de la LGAC.

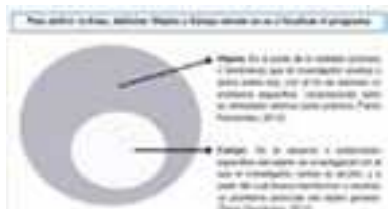


Figura 9. Diada Objeto/Campo en la base metodológica de la búsqueda de información para definir la LGAC. Elaboración propia con información de Tardo Fernández (2012).

Taller 3: Construcción textual de productos relacionados con la línea

de investigación definida por el grupo oferente.

Objetivo. Saber alimentar las líneas de generación de conocimiento definidas en el programa.

Algoritmo de trabajo aplicado en el Taller III

- Retomar las líneas de investigación definidas en el Taller anterior (trabajo en el equipo).

- Poblar la mente de ideas: Proyectar en base a la teoría y la práctica docente – investigativa y la literatura acreditada con la que se respalda la definición de las LGAC, las zonas de oportunidad para la generación de nuevos productos socializables.

Funcionar con la triada siguiente:

- Identificar las editoriales donde publicar. Realizar una búsqueda extensiva en plataformas de Biblioteca Digital de la Dirección General de Bibliotecas de la BUAP (2024).

- Generar boceto de la primera versión del artículo, capítulo u otro producto.

- Identificar comunión de intereses en el grupo, conciliar posibles coautorías.

- Revisión entre pares (elegidos en el Grupo Oferente) de la propuesta.

- Enviar a publicación a la editorial identificada al principio.

Conclusiones

- La implementación de programas de formación continua para los docentes, diseñada de manera que, no solo responda a las necesidades académicas tradicionales, sino que también integre tendencias globales emergentes, debe poner en juego el saber de los docentes, llámese también competencias docentes, en torno a su área disciplinar y también a lo que ella y desde ella articula con dichas tendencias globales, el desarrollo

en un sentido la inclusión educativa, el liderazgo pedagógico y el aprendizaje basado en la investigación.

– La experiencia que se socializa resultó una buena práctica como propedéutico, que en el presente permite avanzar a la Facultad de Administración en la generación de programas de posgrado y que puede, con las adecuaciones necesarias servir de modelo a otras áreas, a directivos y docentes interesados en desarrollar a través de la formación continua un sistema de acciones intensivas que favorezca la elaboración y desarrollo de propuestas de posgrado en colectivos docentes, nuevos y/o heterogéneos.

– El algoritmo planteado en los Talleres sigue una lógica metodológica que va de lo general a lo singular y vuelve a lo

general en un desarrollo en espiral, que permitió fortalecer la experiencia de los docentes en la producción de programas de posgrado, llámese especialidades, maestrías y doctorados.

– La socialización de la experiencia en la Facultad de Administración, puede fortalecer el tejido académico y social del posgrado, al tiempo que los docentes, investigadores y administradores educativos, se apropien de prácticas exitosas y las adaptan a sus propios contextos, de ahí que, la presente comunicación pública de este resultado pueda constituirse en una herramienta de transformación para otras facultades e instituciones educativas.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estado disponible para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

A los docentes de la Facultad de Administración por su disposición a emprender en el ámbito educativo.

Referencias

Álvarez de Zayas, C. M. (1999). La escuela en la vida. Didáctica. Editorial Pueblo y Educación.

ANUIES. (2024, septiembre 26). Anuarios Estadísticos de Educación Superior - ANUIES. Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES). <http://www.anuiex.mx/informacion-y-servicios/informacion-estadistica-de-educacion-superior/anuario-estadistico-de-educacion-superior>

BUAP. (2021). Plan de Desarrollo Institucional 2021-2025. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. https://pdi.buap.mx/sites/default/files/PDI-2022/PDI_Extenso.pdf

Chacón Cuberos, R., Gamarra Vengoechea, M. A., Pérez Mármol, M., Rakdani Arif, F. Z., García Garnica, M., & Castro Sánchez, M. (2024). Asociación entre la modalidad de enseñanza y el desempeño académico, con las estrategias de aprendizaje en Educación Superior. Revista de Educación a Distancia (RED), 24(80). <https://doi.org/10.6018/red.601931>

Comisión Nacional para la Mejora Continua de la Educación. (2020). La mejora continua de la educación Principios, marco de referencia y ejes de actuación. Mejoredu. <https://www.mejoredu.gob.mx/images/publicaciones/principios.pdf>

CONAHCYT. (2023a). Programas Nacionales Estratégicos del CONAHCYT (PRONACES). Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). <https://conahcyt.mx/pronaces/>

CONAHCYT. (2023b, octubre 18). Sistema Nacional de Posgrados (SNP) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

Dirección General de Bibliotecas BUAP. (2024). Biblioteca Digital de la Dirección General de Bibliotecas BUAP. Dirección General de

Fullan, M. (2020). Liderar en una cultura de cambio. Morata.

González Peña, M. V., Escalante Plá, L., & Soares, L. (2021). Confluencias teóricas entre extensión, aprendizaje-servicio y responsabilidad social. Buenas prácticas universitarias. Masquedós - Revista de Extensión Universitaria, 6(6). <https://ojs.extension.unicen.edu.ar/index.php/masquedots/article/view/123>

González Peña, M. V., & Gomes Soares, L. J. (2020). Contribución de la educación popular al pensamiento descolonizador. Prácticas pedagógicas universitarias en Cuba y Brasil. Revista Diálogo Educativo, 20(65). <https://doi.org/10.7213/1981-416X.20.065.DS08>

Hargreaves, A., & Fink, D. (2008). El liderazgo sostenible: siete principios para el liderazgo en centros educativos innovadores. Morata. <http://digital.casalini.it/9788471127662>

IIEP UNESCO. (2017). Agenda 2030. Instituto Internacional de Planeamiento de la Educación (IIEP) de la UNESCO. Oficina para América Latina y el Caribe. <https://www.buenosaires.iiep.unesco.org/es/taxonomy/term/151>

ONU. (2015, marzo 22). Objetivo 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos. Organización de las Naciones Unidas (ONU). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/>

Ornelas, C. (2020). Educación: reforma, conflicto y cambio institucional. En S. Comboni Salinas & J. M. Juárez Núñez (Eds.), Interculturalidad y diversidad en la educación: concepciones, políticas y prácticas. Universidad Autónoma Metropolitana. <https://biblioteca.clacso.edu.ar/Mexico/dcsh-uam-x/20201118022700/Interculturalidad-Educacion.pdf>

Ricalde, J. M. (2024). Desafíos educativos en México e

Iberoamérica: acciones para transformar la educación. Revista Inspiración Educativa México, 17(6), 6–20. https://www.revistainspiracioneducativa.com/RIE_MX_17_NUMERO.pdf

Rodríguez-García, A.-M., & Martínez-Heredia, N. (2019). Conocimiento profesional del docente en educación superior: una confrontación entre lo real y lo deseado. Revista Iberoamericana de Educación Superior, 10(29), 25–41. <https://doi.org/10.22201/iisue.20072872e.2019.29.521>

Schleicher, A. (2018). Primera Clase. Cómo construir una escuela de calidad para el siglo XXI. OECD. <https://doi.org/10.1787/9788468050126-es>

SEP. (2023). La Nueva Escuela Mexicana: orientaciones para padres y comunidad en general. Subsecretaría de Educación Media Superior de la SEP. <https://educacionmediasuperior.sep.gob.mx/propuestaMCCEMS>

Tobón, S. (2007). El enfoque complejo de las competencias y el diseño curricular por ciclos propedéuticos. Acción Pedagógica, ISSN-e 1315-401X, Vol. 16, No. 1, 2007, págs. 14–28, 16(1), 14–28. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2968540&info=resumen&idioma=ENG>

CÚRCUMÁ (CÚRCUMA LONGA): FUNDAMENTOS QUÍMICOS, PROPIEDADES BIOLÓGICAS Y APLICACIONES EN LA MEDICINA MORERNA

TURMERIC (CURCUMA LONGA): CHEMICAL FOUNDATIONS,
BIOLOGICAL PROPERTIES, AND APPLICATIONS IN MODERN
MEDICINE

José María Fernández-Luna ^{*(1)}, Claudia
Santacruz-Vázquez (2)

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 32, 2025, pp. 43 - 53

RD-ICUAP

Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma
de Puebla, Avenida San Claudio y 18 sur, C.P. 72570 Puebla, Puebla,
México

Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma
de Puebla, Avenida San Claudio y 18 sur, C.P. 72570 Puebla, Puebla,
México

*Autor de correspondencia: +52 2491879461

Correos electrónicos:

jose.fernandezl@alumno.buap.mx, clausanva@yahoo.com.mx

<https://orcid.org/0009-0008-4723-3908>

<https://orcid.org/0000-0001-6660-469X>

Resumen

La Cúrcuma (*Cúrcuma longa*) es una planta ampliamente reconocida en la medicina tradicional y moderna debido a sus excepcionales propiedades químicas y biológicas. Su rizoma, de estructura fibrosa, contiene una gran cantidad de compuestos bioactivos, siendo la curcumina el principal responsable de sus beneficios. La curcumina es un polifenol con grupos funcionales que le confieren propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas y anticancerígenas. Estos compuestos actúan sobre diversas vías bioquímicas, favoreciendo la reducción de procesos inflamatorios y mejorando la función del sistema inmunológico. En la medicina moderna, la cúrcuma se utiliza como complemento terapéutico en el tratamiento de enfermedades inflamatorias crónicas, trastornos metabólicos como la diabetes, y enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer. Además, ha mostrado beneficios en la protección del sistema cardiovascular y en la mejora de la salud digestiva. La cúrcuma también se emplea en la formulación de fármacos y suplementos nutricionales, así como en la creación de tratamientos naturales para el control del dolor y la mejora de la calidad de vida. Su uso, tanto como extracto como en forma de polvo, se ha expandido en diversos campos, consolidándose como un remedio eficaz en la medicina alternativa y complementaria.

Palabras clave: curcumina, extracción, antioxidante, salud humana, alimentos

Abstract

Turmeric (*Curcuma longa*) is a plant widely recognized in both traditional and modern medicine due to its exceptional chemical and biological properties. Its fibrous rhizome contains a large number of bioactive compounds, with curcumin being the primary responsible for its benefits. Curcumin is a polyphenol with functional groups that provide antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, and anticancer properties. These compounds act on various biochemical pathways, promoting the reduction of inflammatory processes and enhancing immune system function. In modern medicine, turmeric is used as a therapeutic supplement in the treatment of chronic inflammatory diseases, metabolic disorders such as diabetes, and neurodegenerative diseases like Alzheimer's. Furthermore, it has shown benefits in protecting the cardiovascular system and improving digestive health. Turmeric is also utilized in the formulation of drugs and nutritional supplements, as well as in the creation of natural treatments for pain management and improving quality of life. Its use, both as an extract and in powdered form, has expanded across various fields, establishing itself as an effective remedy in alternative and complementary medicine.

Keywords: Curcumin; Extraction; Antioxidant; Human health; Foods

Introducción a la dieta cetogénica

La cúrcuma (*Curcuma longa* L.) pertenece a la familia Zingiberaceae y es una planta herbácea perenne de gran relevancia en la medicina tradicional y la gastronomía. Su uso se remonta a miles de años en sistemas medicinales como la Ayurveda y la Medicina Tradicional China, donde ha sido empleada por sus propiedades curativas y preventivas (Priyadarsini, 2014). El principal compuesto bioactivo de la cúrcuma, la curcumina, es un polifenol responsable de su característico color amarillo y de una amplia gama de actividades biológicas.

La cúrcuma (Figura 1) tiene distintos compuestos entre ellos destaca un alto porcentaje de curcumina en su composición, este es el compuesto fitoquímico que otorga el color amarillo a la cúrcuma. Muchas investigaciones dentro de las últimas décadas han demostrado que las aplicaciones médicas de la cúrcuma son debidas a la presencia de la curcumina (Baell y Walters, 2014).

La curcumina, de composición química $C_{21}H_{20}O_6$ (Fig.2). Es un polvo cristalino insoluble en agua, pero soluble en etanol, acetona y ácido acético.



Figura 1. Cúrcuma longa

Fuente: HortiDaily (publicado el 21 de octubre de 2021)

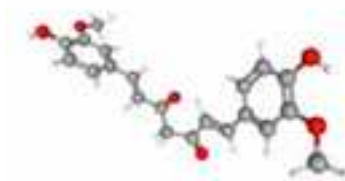


Figura 2. Estructura tridimensional de la curcumina <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/curcumin> de 2021)

Fundamentos químicos de la cúrcuma

La cúrcuma es una planta de la familia Zingiberaceae, conocida principalmente por su raíz, que contiene compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas. El principal componente químico activo de la cúrcuma es la curcumina, que es responsable de la mayoría de sus efectos beneficiosos (Hewlings y Kalman, 2017).

Curcumina

Es un polifenol que constituye alrededor del 2-5% del peso seco de la raíz de cúrcuma. Su estructura química está compuesta por un sistema de doble enlace conjugado, tiene grupos funcionales fenólicos y una cadena metilénica que facilitan su interacción con diversas biomoléculas, lo que otorga una amplia gama de actividades biológicas.

Los compuestos fenólicos que presenta, en concreto polifenoles, son del grupo de los curcuminoides, derivados diarilmetálicos que son los responsables del color amarillo intenso de la cúrcuma (Saiz y Pérez, 2014).

El curcuminoides más importante es la curcumina, que se obtuvo por primera vez por síntesis en el laboratorio de S. Kostanecki en Berna en el año de 1913 (Mathew y Hsu, 2018).

Diferentes formas de curcumina

Existen tres principales formas de curcumina en la cúrcuma: curcumina I, curcumina II (bisdemetoxicurcumina) y curcumina III (demetoxicurcumina). Estas varían en su estructura y propiedades, pero todas poseen la capacidad de modificar la actividad celular, inhibiendo la proliferación de células cancerígenas y reduciendo el daño oxidativo. Los curcuminoides comprenden el 2-9 % de la planta, siendo los mayoritarios y más usados comercialmente el diferuloilme-

tano (curcumina I) con una proporción en la planta del 77%, demetoxicurcumina (curcumina III) en proporción de 17%, bisdemetoxicurcumina (curcumina II) en un 3% y la ciclocurcumina (Taylor y Leonard, 2011)

Propiedades biológicas

La cúrcuma (*Cúrcuma longa*) posee diversas propiedades biológicas que han sido ampliamente estudiadas en el ámbito biomédico y farmacéutico. Sus efectos terapéuticos se deben, en gran parte, a la presencia de curcuminoides, especialmente la curcumina, así como a otros compuestos bioactivos como las turmeronas (Hewlings et al, 2017). Entre las principales propiedades biológicas de la cúrcuma se encuentran:

Actividad antioxidante

La curcumina actúa como un potente antioxidante al neutralizar radicales libres y reducir el estrés oxidativo en las células. Su estructura fenólica le permite donar electrones para estabilizar especies reactivas de oxígeno (ROS), protegiendo así a las biomoléculas del daño oxidativo.

La cúrcuma se ha empleado para ayudar a la función hepática, tanto en medicina ayurvédica como en la medicina china. La cúrcuma aumenta el contenido de glutatión y su actividad glutatión-S-transferasa en hígado. Estas sustancias son protectoras clave frente a los efectos dañinos de las toxinas. La curcumina es un poderoso antioxidante que influye sobre la expresión de enzimas relacionadas con procesos redox, como la glutatión-S-transferasa o el citocromo P450 oxidasa, capaces de neutralizar las especies reactivas de oxígeno (Gryniewicz y Slifirski, 2012).

En el estudio de Fernández-Luna et al. (2025), se evaluó la encapsulación de curcuminoides extraídos de *Cúrcuma longa* L. mediante la técnica de electrohilado, utilizando alcohol polivinílico (PVA) como polímero y etanol como disolvente. Los resultados mostraron que la formulación

compuesta por PVA al 10% y extracto etanólico de cúrcuma (E1) produjo microfibras más uniformes y de menor diámetro (0.485 μm) que aquellas con ácido acético glacial añadido, además de una fluorescencia detectable a 405, 488 y 561 nm, lo que confirmó la preservación de las propiedades bioactivas. En pruebas de aplicación, las microfibras E1 redujeron en un 50% la formación de peróxidos en un producto de confitería respecto a empaques convencionales, evidenciando su potencial como material activo para prolongar la vida útil de alimentos.

Propiedades antiinflamatorias

La curcumina inhibe la activación de factores de transcripción proinflamatorios, como NF- κ B, y reduce la producción de citocinas inflamatorias como IL-6, IL-1 β y TNF- α . También modula la actividad de enzimas como la ciclooxigenasa-2 (COX-2) y la lipoxigenasa (LOX), responsables de la síntesis de mediadores inflamatorios.

Se ha demostrado que la curcumina puede contribuir a la reducción de afecciones inflamatorias como la esclerosis múltiple, la artritis reumatoide y la psoriasis, debido a su capacidad para regular la actividad de las citoquinas, que son moléculas involucradas en la inflamación. Su efecto antiinflamatorio se atribuye, en parte, a la inhibición de la producción de prostaglandinas con función inflamatoria (Witkin y Li, 2013). En una investigación realizada con 45 pacientes diagnosticados con artritis reumatoide, la administración diaria de 500 mg de curcumina logró disminuir de manera significativa los marcadores de inflamación sin generar efectos secundarios negativos (Chandram y Goel, 2012).

Diversos estudios científicos han demostrado que la curcumina posee múltiples beneficios medicinales, incluyendo su capacidad para disminuir la inflamación en la artritis, prevenir la arteriosclerosis, proteger el hígado, aliviar trastornos respiratorios y gastrointestinales, así como tratar afecciones cutáneas como la psoriasis y los eczemas. Además, se ha relacionado con la prevención del cáncer y

una potente actividad antioxidante (Vistel Vigo et al., 2003).

Actividad anticancerígena

La curcumina ha mostrado efectos anti-proliferativos y proapoptóticos en células cancerosas, inhibiendo rutas de señalización clave en la progresión tumoral. Además, puede interferir en la angiogénesis y la metástasis al modular factor como VEGF y MMPs, que son esenciales para la diseminación del cáncer.

La curcumina también posee propiedades anticancerígenas, ya que puede disminuir el crecimiento de tumores y atenuar efectos secundarios del cáncer, como la fatiga, la depresión y el insomnio (Witkin y Li, 2013). Su mecanismo de acción incluye la inhibición, tanto directa como indirecta, de la ciclooxigenasa-2 (COX-2), una proteína clave en la respuesta inflamatoria que ha sido vinculada con el desarrollo de ciertos tipos de cáncer. En células malignas, la curcumina ejerce una acción antiinflamatoria y limita la proliferación celular al suprimir la expresión de interleucinas como IL-1 β , IL-6 y el factor de necrosis tumoral- α (TNF- α) (Taylor y Leonard, 2011).

Propiedades gastroprotectoras

Se ha demostrado que la cúrcuma ayuda en el tratamiento de trastornos digestivos como la gastritis y la úlcera gástrica, promoviendo la secreción de mucosa gástrica protectora y reduciendo la inflamación en el tracto gastrointestinal.

La curcumina desempeña un papel fundamental en la protección del sistema gastrointestinal, ya que ha demostrado su capacidad para inhibir la activación de diversos factores de transcripción involucrados en la inflamación intestinal, como el factor nuclear kappa- β (NF- κ B) y las β -catequinas (Taylor y Leonard, 2011). Su uso en el tratamiento de la gastritis y la acidez se remonta a tiempos antiguos, debido a su capacidad para estimular la

producción de mucosa gástrica y fortalecer la protección de las paredes del estómago. Además, favorece el flujo biliar hacia el intestino, lo que contribuye a una mejor digestión de las grasas presentes en la alimentación.



<https://comofazeremcasa.net/como-plantar-curcuma/>

curcuma/

Obtención de los curcuminoides

Extracción con solventes orgánicos

Este método tradicional implica la maceración de los rizomas secos y pulverizados de cúrcuma en solventes como etanol, metanol, acetato de etilo o acetona. Posteriormente, el extracto se filtra y el solvente se evapora para obtener una oleorresina rica en curcuminoides. Aunque es una técnica sencilla, puede requerir grandes volúmenes de solvente y tiempos prolongados de extracción (Chaparro et al., 2019).

Extracción asistida por ultrasonido (EAU)

Esta técnica utiliza ondas ultrasónicas para mejorar la penetración del solvente en la matriz vegetal, facilitando la liberación de los curcuminoides. Estudios han demostrado que la EAU, empleando una mezcla de etanol y agua (50:50 v/v) a temperaturas de 60 °C durante 30 minutos, incrementa significativamente el rendimiento de extracción en compara-

una potente actividad antioxidante (Vistel Vigo et al., 2003).

Actividad anticancerígena

La curcumina ha mostrado efectos anti-proliferativos y proapoptóticos en células cancerosas, inhibiendo rutas de señalización clave en la progresión tumoral. Además, puede interferir en la angiogénesis y la metástasis al modular factor como VEGF y MMPs, que son esenciales para la diseminación del cáncer.

La curcumina también posee propiedades anticancerígenas, ya que puede disminuir el crecimiento de tumores y atenuar efectos secundarios del cáncer, como la fatiga, la depresión y el insomnio (Witkin y Li, 2013). Su mecanismo de acción incluye la inhibición, tanto directa como indirecta, de la ciclooxigenasa-2 (COX-2), una proteína clave en la respuesta inflamatoria que ha sido vinculada con el desarrollo de ciertos tipos de cáncer. En células malignas, la curcumina ejerce una acción antiinflamatoria y limita la proliferación celular al suprimir la expresión de interleucinas como IL-1 β , IL-6 y el factor de necrosis tumoral- α (TNF- α) (Taylor y Leonard, 2011).

Propiedades gastroprotectoras

Se ha demostrado que la cúrcuma ayuda en el tratamiento de trastornos digestivos como la gastritis y la úlcera gástrica, promoviendo la secreción de mucosa gástrica protectora y reduciendo la inflamación en el tracto gastrointestinal.

La curcumina desempeña un papel fundamental en la protección del sistema gastrointestinal, ya que ha demostrado su capacidad para inhibir la activación de diversos factores de transcripción

involucrados en la inflamación intestinal, como el factor nuclear kappa- β (NF- κ B) y las β -catequinas (Taylor y Leonard, 2011). Su uso en el tratamiento de la gastritis y la acidez se remonta a tiempos antiguos, debido a su capacidad para estimular la producción de mucosa gástrica y fortalecer la protección de las paredes del estómago. Además, favorece el flujo biliar hacia el intestino, lo que contribuye a una mejor digestión de las grasas presentes en la alimentación.



<https://comofazeremcasa.net/como-plantar-curcuma/>

Obtención de los curcuminoides

Extracción con solventes orgánicos

Este método tradicional implica la maceración de los rizomas secos y pulverizados de cúrcuma en solventes como etanol, metanol, acetato de etilo o acetona. Posteriormente, el extracto se filtra y el solvente se evapora para obtener una oleoresina rica en curcuminoides. Aunque es una técnica sencilla, puede requerir grandes volúmenes de solvente y tiempos prolongados de extracción (Chaparro et al., 2019).

ción con métodos convencionales (Muñoz et al., 2020).

Extracción con CO₂ supercrítico

Este método utiliza dióxido de carbono en estado supercrítico como solvente para extraer los curcuminoides. Es una técnica eficiente que evita el uso de solventes orgánicos tóxicos y permite obtener extractos de alta pureza. Sin embargo, requiere equipamiento especializado y puede ser más costosa (García et al., 2021).

Uso de aceites comestibles como solvente

Investigaciones recientes han explorado la utilización de aceites vegetales, como

el de oliva, soja y girasol, para la extracción de curcuminoides, aprovechando su naturaleza lipofílica. El aceite de oliva ha mostrado la mayor eficiencia, alcanzando concentraciones de hasta 158,921 ppm de curcuminoides bajo condiciones específicas de extracción (Rodríguez et al., 2022).

Cromatografía flash para purificación

Tras la extracción, los curcuminoides pueden purificarse mediante técnicas cromatográficas. Por ejemplo, la cromatografía flash ha sido empleada para separar y purificar los tres principales curcuminoides presentes en la cúrcuma, utilizando sistemas de solventes adecuados y detección por espectrometría de masas (López et al., 2023).

Conclusiones

El presente estudio resalta la importancia de la cúrcuma (*Cúrcuma longa* L.) en la medicina moderna, fundamentando su valor en la diversidad de compuestos bioactivos que posee, especialmente, la curcumina. A lo largo de la investigación, se ha evidenciado que sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas y anticancerígenas la convierten en un recurso prometedor en la prevención y tratamiento de diversas enfermedades. Su aplicación en el ámbito farmacéutico, así como su potencial en la formulación de nutracéuticos y suplementos, refuerzan su relevancia en la salud humana.

No obstante, a pesar de los numerosos estudios preclínicos y clínicos que han demostrado sus efectos terapéuticos, persisten desafíos relacionados con su biodisponibilidad y estabilidad. En este sentido, futuras investigaciones deben enfocarse en el desarrollo de sistemas de encapsulación y estrategias de formulación que optimicen su absorción y eficacia en el organismo. Asimismo, se requiere mayor evidencia científica que respalde su uso en terapias convencionales, permitiendo su integración en protocolos médicos estandarizados.

En conclusión, la cúrcuma representa una fuente natural con un enorme potencial en la medicina moderna, cuyo estudio continuo permitirá maximizar sus beneficios y ampliar sus aplicaciones terapéuticas de manera segura y efectiva.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia. Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la BUAP por el apoyo complementario a José María Fernández Luna

Referencias

- Baell, J., & Walters, M. A. (2014). Chemistry: Chemical con artists foil drug discovery. *Nature*, 513(7519), 481-483. <https://doi.org/10.1038/513481a>
- Base de datos Genome.jp. Rutas metabólicas y metabolismo 2º de plantas. <http://www.genome.jp>
- Chaparro, J., Pérez, L., & Ramírez, M. (2019). Optimización de la extracción de curcuminoides mediante solventes orgánicos. *Sedici UNLP*.
- Chandram, B., & Goel, A. (2012). A randomized, pilot study to assess the efficacy and safety of curcumin in patients with active rheumatoid arthritis. *Phytother Res.*, 11, 1719-1725.
- Fernández-Luna, J. M., Santacruz-Vázquez, V., Toxqui-López, S., Córdova-de la Luz, J. L., & Santacruz-Vázquez, C. (2025). Encapsulation of antioxidants extracted from turmeric (*Cúrcuma longa* L) by the electrospinning method. *World Journal of Biosciences and Biotechnology*, 1(1), 1-18. <https://doi.org/10.29267/wjbb.2025.1.1.1-18>
- García, D., Torres, J., & Fernández, R. (2021). Extracción de curcuminoides con CO₂ supercrítico: eficiencia y aplicaciones. *Journal Ingeniar*.
- Gryniewicz, G., & Slifirski, P. (2012). Curcumin and curcuminoids in quest for medicinal status. *Acta Biochimica Polonica (ABP)*, 59(2), 201-212.
- Hewlings, S. J., & Kalman, D. S. (2017). Curcumin: A review of its effects on human health. *Foods*, 6(10), 92.
- López, M., Sánchez, P., & Díaz, E. (2023). Cromatografía flash para la purificación de curcuminoides en cúrcuma en polvo. *Advion*.
- Mathew, D., & Hsu, W. L. (2018). Antiviral potential of curcumin. *Journal of Functional Foods*, 40, 692-699.
- Muñoz, C., Herrera, P., & Gómez, F. (2020). Eficiencia de la extracción asistida por ultrasonido en la obtención de curcuminoides. *Colmayor*.
- Priyadarsini, K. I., Maity, D. K., Naik, G. H., Kumar, M. S., Unnikrishnan, M. K., Satav, J. G., & Mohan, H. (2003). Papel del OH fenólico y del hidrógeno de metileno en las reacciones de radicales libres y la actividad antioxidante de la curcumina. *Radic. Libre. Biol. Med.*, 35, 475-484.

- Rodríguez, A., Morales, S., & Vázquez, L. (2022). Uso de aceites vegetales en la extracción de curcuminoides de *Cúrcuma longa* L. CONICET.
- Saiz de Cos, P., & Pérez-Urria Carril, E. (2014). *Cúrcuma* I (*Curcuma longa* L.).
- Taylor, R., & Leonard, M. (2011). Curcumin for Inflammatory Bowel Disease: A Review of Human Studies. *Alternative Medicine Review*, 16(2), 152-156.
- Vistel Vigo, M., Ríos Silveira, I., Freire González, A., & Silveira García, D. (2003). *Curcuma longa* L., un estudio integrador. *Infogest*.
- Witkin, J. M., & Li, X. (2013). Curcumin, an active constituent of the ancient medicinal herb *Curcuma longa* L.: some uses and the establishment and biological basis of medical efficacy. *CNS Neurol*

LUPUS ERITEMATOSO SISTÉMICO Y EMBARAZO: ACLARANDO MITOS CON EVIDENCIA MÉDICA

LUPUS ERYTHEMATOSUS SYSTEMIC AND PREGNANCY CLARIFYING MYTHS WITH MEDICAL EVIDENCE

(1) Ontiveros Hernández Allison

(1) Munguía Realpozo Pamela*

(2) Mendoza Pinto Claudia

(1) Facultad de Medicina, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Calle 13 Sur 2702, Los Volcanes, C.P 72420, Heroica Puebla de Zaragoza, Pue.

(2) Centro de Investigación Biomédica de Oriente. Instituto Mexicano del Seguro Social, Hospital General de Zona No. 5 Km 4.5 Carretera Federal Atlixco-Metepec 74360 Metepec, Puebla, México. Bachillerato Tecnológico Agropecuario sede Ixtepec del Complejo Regional Nororiental de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

*Autor de correspondencia: pamela.munguia@yahoo.com.mx
rmiro.alli.2400@hotmail.com
cmendoza26@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0655-304X>
<https://orcid.org/0000-0002-5101-7705>
<https://orcid.org/0000-0002-6967-7939>

Resumen

El Lupus Eritematoso Sistémico (LES) es una enfermedad autoinmune, inflamatoria y crónica. Su diagnóstico se fundamenta en la presencia de autoanticuerpos y en manifestaciones clínicas que pueden variar en la afectación de órganos y sistemas, así como en su severidad. A pesar de que la fertilidad no suele verse afectada, las pacientes con LES pueden presentar complicaciones durante el embarazo. Durante el embarazo, se producen cambios fisiológicos que pueden empeorar la afección renal y cardíaca por brotes que se pueden presentar hasta en el 60% en estos pacientes, además puede ser causa de morbilidad del bebé como aborto espontáneo, parto prematuro y restricción de crecimiento del bebé en el útero. La planificación y monitoreo estricto del embarazo son esenciales, y muchos mitos sobre fertilidad y lactancia han sido desmentidos, de hecho, algunos de los medicamentos utilizados para tratar el LES, como la hidroxicloroquina, son seguros durante embarazo y lactancia. El manejo adecuado de los riesgos maternos y fetales requiere un enfoque multidisciplinario para asegurar el bienestar del binomio.

Palabras clave: Lupus Eritematoso Sistémico; Embarazo; Mantenimiento del Embarazo; Complicaciones del Embarazo; Fertilidad; Lactancia materna; Atención Preconceptiva

Abstract

Systemic Lupus Erythematosus (SLE) is a chronic autoimmune inflammatory disease. Diagnosis is based on autoantibodies and various clinical manifestations, ranging from mild symptoms to severe complications affecting multiple organs. Importantly, fertility is generally not impacted by SLE. During pregnancy, physiological changes may exacerbate renal and cardiac function in individuals with SLE. Common complications of pregnancy in these patients include miscarriage, preterm birth, restricted fetal growth, and an increased risk of disease flare-ups, which can occur in up to 60% of cases. Careful planning and monitoring during pregnancy are crucial, and many myths regarding fertility and breastfeeding have been debunked. Some medications used to treat SLE, such as hydroxychloroquine, are safe to use during pregnancy and breastfeeding. Effective management of both maternal and fetal risks requires a multidisciplinary approach to ensure the well-being of both mother and child.

Keywords: Lupus Erythematosus Systemic; Pregnancy; Pregnancy Maintenance; Pregnancy Complications; Fertility; Breastfeeding; Preconception Care

Generalidades del Lupus Eritematoso Sistémico

La dieta cetogénica, también conocida como "keto", es un tipo de alimentación que ha ganado popularidad en los últimos años entre quienes buscan perder peso, mejorar su salud o aumentar su rendimiento físico. Esta dieta se basa en consumir muy pocos carbohidratos y una alta cantidad de grasas, llevando al cuerpo a un estado llamado cetosis (figura 1). En este estado, el cuerpo utiliza la grasa como principal fuente de energía en lugar de los carbohidratos. Aunque parece una dieta prometedora, es importante conocer en profundidad cómo funciona, sus posibles beneficios y riesgos, y para quién es realmente adecuada.



Figura 1. Manifestaciones clínicas del Lupus Eritematoso Sistémico, modificado de Molina, J., & Molina, J. F., 2019. <https://www.aeped.es/sites/default/files/documentos/9-LES.pdf>

Los cambios anatómicos, fisiológicos y bioquímicos que ocurren durante el embarazo son significativos e inician poco después de la fecundación y persisten a lo largo de la gestación, como respuesta a estímulos provenientes del feto y la placenta (Cunningham F. et al., 2015). Algunos signos y síntomas normales que acompañan el embarazo pueden ser confundidos con la afectación intrínseca del LES, como es el dolor articular, fatiga, erupciones cutáneas e hinchazón de los pies (Dao, K. H., & Bermas, B. L., 2022).

Las manifestaciones clínicas de LES pueden agravarse durante el embarazo y ocasionar complicaciones tanto para la madre como para el bebé (Zucchi, D. et al., 2022), dado que, durante este periodo, existe un riesgo de reactivación de la enfermedad (Pons-Estel, G.J., & Pons-Estel, B.A., 2024), hasta del 60% (Merz, W. M. et al., 2022). Algunas de ellas son aborto espontáneo, muerte dentro del útero, crecimiento limitado dentro del útero y parto prematuro, posterior a su nacimiento son poco frecuentes las complicaciones.

Aunque los resultados del embarazo en pacientes con LES han mejorado significativamente en los últimos años, la tasa de pérdida fetal es mayor en comparación con mujeres embarazadas sin la enfermedad (Mokbel, A., Geilan, A. M. & AboElghait, S., 2013).

Lupus Eritematoso Sistémico y embarazo

Durante el embarazo, el cuerpo de la madre experimenta cambios en el sistema inmunológico para mantener un equilibrio, tanto como para no atacar al bebé como si fuera una amenaza, como para mantener la protección de agentes externos. Uno de los cambios más importantes es el ajuste de las células llamadas linfocitos, además se presentan cambios en niveles de hormonas, como los estrógenos, que también influyen en el funcionamiento de estas células, en mujeres con LES (Tan, Y. et al., 2022).

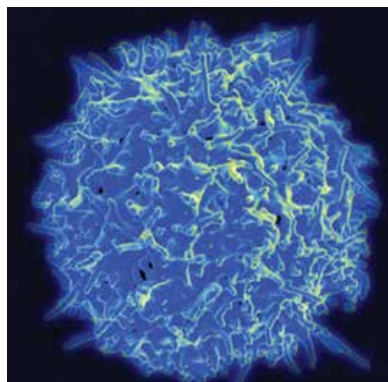


Figura 2. Linfocito T. El sistema inmunológico de la madre ajusta sus células, como los linfocitos T, para evitar atacar al bebé. <https://access-medicina.biblioteca.uap.elogim.com/ViewLarge.aspx?figid=281683608&gbosContainerID=0&gbosid=0&groupid=0§ionId=281683388&multimediaId=undefined>

urante el embarazo el corazón también presenta cambios, con aumento de la cantidad de sangre, el corazón bombea más sangre y disminuye la presión arterial.

Los riñones también, aumentan de tamaño hasta un 30%, y pueden llenarse de agua, causada por la presión del útero en crecimiento, también se presenta un aumento entre un 40 y un 65% del flujo de sangre que llega a los riñones, y la capacidad del riñón para filtrar sustancias se incrementa entre un 50 y un 85% (Carrillo-Mora, P. et al., 2021). Estos cambios son normales en una mujer embarazada sana y permiten el desarrollo adecuado del bebé, pero en el contexto de una embarazada con LES pueden complicar o superponerse a la enfermedad (Clowse ME., 2007).

Mitos comunes sobre lupus y embarazo

Que la fertilidad se ve deteriorada en pacientes con LES es uno de los grandes mitos. La realidad es que no se ve alterada en la mayoría de las pacientes. Ciertos factores de riesgo podrían tener un impacto negativo, tales como la edad, otras enfermedades coexistentes, que la enfermedad esté activa al momento del embarazo (Bălănescu, A., Donisan, T., & Bălănescu, D., 2017), y el uso de medicamentos por ejemplo la ciclofosfamida que pueden provocar falla ovárica prematura (Zucchi, D., Tani, C., & Mosca, M., 2024).

Los avances en la medicina han permitido que estos riesgos se reduzcan significativamente. La planificación del embarazo y se mantener al menos 6 meses de no tener síntomas de la actividad, disminuye los riesgos. En caso de presentarse actividad el riesgo de partos prematuros puede elevarse hasta un 33%

(Merz, W. M., Fischer-Betz, R., Hellwig, K., Lamprecht, G., & Gembruch, U., 2022) En realidad, son pocas las condiciones que contraindican el embarazo en pacientes con LES. Entre estas se encuentran la hipertensión pulmonar con presión arterial pulmonar sistólica >50 mmHg, restricción funcional ventilatoria severa, insuficiencia cardíaca grave, enfermedad renal crónica en estadios 4 o 5, antecedentes de preeclampsia o síndrome HELLP, así como un accidente cerebrovascular o un brote grave de la enfermedad en los seis meses previos (Bălănescu, A., Donisan, T., & Bălănescu, D., 2017).

También, se llegó a considerar que la lactancia materna podía desencadenar brotes de LES y debido a los medicamentos utilizados en el tratamiento de la enfermedad, se desaconsejaba su práctica. No obstante, estudios recientes muestran que no hay un incremento significativo en la actividad de la enfermedad y que los medicamentos usados se encuentra en mínimas concentraciones en leche materna (Bălănescu, A., Donisan, T., & Bălănescu, D., 2017).

Riesgos maternos

Los brotes de actividad de LES durante el embarazo no son frecuentes, aunque algunos autores comentan que se puede presentar manifestaciones clínicas hasta en el 50% de los pacientes, no obstante si antes del embarazo se tuvo enfermedad renal por lupus, es más probables las recaídas, estas recaídas pueden deberse a los cambios del medicamento (por algunos ser tóxicos durante el embarazo) (Petri, M., 2020), o por los cambios fisiológicos propios del embarazo.

La enfermedad renal por lupus puede presentarse por primera vez durante el embarazo hasta en un 30% (Zucchi, D., Fischer-Betz, R., & Tani, C. 2023), se ha demostrado que la nefritis lúpica aumenta el riesgo de hipertensión durante el embarazo y parto prematuro (Smyth, A., et al., 2020). Además de aumentar la posibilidad de presentar preeclampsia, la cual es uno de los estados hipertensivos del embarazo, y se ha demostrado que se presenta entre 2 a 3 veces más en pacien-

tes con LES en comparación con aquellas sin la enfermedad, otros factores que se puede asociar a estos estados hipertensivos del embarazo son: la presencia de anticuerpos antifosfolípidos, trombocitopenia, niveles bajos de complemento, edad materna avanzada, antecedentes de enfermedad hipertensiva en embarazos anteriores, hipertensión preexistente, diabetes y obesidad (Dalal, D. S., Patel, K. A. & Patel, M. A., 2019).



Figura 3. Complicaciones en el embarazo. <https://cpedrosa.com/obstetricia-y-control-del-embarazo/prevenir-complicaciones-parto/>

Riesgos fetales

La complicación más común es el parto prematuro, definido como aquel que ocurre antes de las 37 semanas de gestación, con una tasa de incidencia reportada del 30-40% aunque en los últimos años estas cifras se han ido reduciendo hasta un 17% (Dao, K. H. & Bermas, B. L., 2022). Se han identificado como factores de riesgo tanto la presencia de la enfermedad activa como el tratamiento con glucocorticoides durante el embarazo (Chakravarty, E. F. et al., 2005), además de la presencia de síndrome de anticuerpos antifosfolípidos, especialmente, cuando se presenta con una sustancia denominada anticoagulante lúpico (Yelnik, C. M. et al., 2016). Otra complicación es la ruptura prematura de membranas, la cual se presenta con más frecuencia en pacientes con LES (Johnson, M. J. et al., 1995) en comparación con las mujeres sin enfermedad. Finalmente, es pertinente mencionar la restricción del crecimiento intrauterino, una condición poco común que en mujeres sanas está asociada a factores como el tabaquismo y la hipertensión. En el contexto de embarazadas con LES, se presenta en un 5,3% comparada con el 1,6% de pacientes sanas. Este riesgo es particularmente elevado cuando el LES está activo al momento de la concepción o en los seis meses previos al embarazo (Zucchi, D., Fischer-Betz, R., & Tani, C. 2023).

Logrando un embarazo seguro

El objetivo antes del embarazo es que la enfermedad de LES esté bien controlada o en fase de baja actividad el Colegio Mexicano de Reumatología recomienda mantener esta condición durante al menos 6 meses antes de intentar embarazarse (Salinas, M. Á. S. et al., 2015). Se recomienda planificar el embarazo con anticipación para revisar y ajustar a los medicamentos que sean seguros durante el mismo (Somers, E. C., 2020). El propósito del asesoramiento preconcepcional es minimizar el riesgo de embarazos no deseados, mantener baja actividad, y evitar complicaciones, como mostramos en la figura 4 (Zucchi, D., Fischer-Betz, R., & Tani, C., 2023).

Objetivos del asesoramiento preconcepcional
• Evaluar la actividad de la enfermedad materna, aconsejar preparar al embarazo si la enfermedad está activa.
• Tomar intervenciones para optimizar el control de la enfermedad.
• Responder la medicación compatible con el embarazo y la lactancia.
• Realizar la serología, especialmente autoanticuerpos que afectan los resultados del embarazo.
• Realizar el diagnóstico prenatal, realizar tests prenatales (amniocentesis y/o cordocentesis) en el primer trimestre.
• Utilizar técnicas de imagen (ultrasonido) como seguimiento prenatal, detección de alteraciones de desarrollo y anomalías estructurales fetales.
• Implementar estrategias preventivas (como Hidroclorotiazida, suplemento de Ácido Fólico y vitamina B12).
• Discutir con la paciente y su pareja los riesgos maternos y fetales y considerar preparar al nacimiento si es necesario.
• Informar sobre los riesgos de interrupción de la medicación, sobre el feto, de parto y complicaciones del embarazo.
• Discutir sobre la efectividad del tratamiento y un acudo de alta efectividad (paciente, hijo).
• Discutir la anticoncepción para asegurar un embarazo en el momento adecuado, sobre el uso de métodos potenciales como ideales.

Figura 4. Objetivos del asesoramiento preconcepcional (Zucchi, D., Fischer-Betz, R., & Tani, C., 2023).
Elaboración propia.

Durante esta evaluación preconcepcional se debe verificar el estado de autoanticuerpos, niveles de proteínas, marcadores de inflamación y actividad en la sangre, ya que podrían ayudar a predecir las complicaciones y a identificar con antelación a mujeres con mayor riesgo (Tan, Y. et al., 2022). Por ejemplo, los anticuerpos anti-Ro/SSA y anti-La/SSB están relacionados a bloqueo cardíaco congénito y el lupus neonatal, por ello, se recomienda que las mujeres embarazadas con estos autoanticuerpos se realicen ecocardiografías fetales regulares desde la semana 16 de gestación y reciban hidroxiclороquina para disminuir el riesgo (Petri M. 2020).

Lactancia en pacientes con Lupus Eritematoso Sistémico

Se ha descrito que las pacientes con LES suelen abandonar más la lactancia que aquellas sanas (Anderson P. O., 2019). A pesar de lo que se cree, muchos medicamentos para el LES son seguros durante la lactancia, por ejemplo, la hidroxiclороquina, antiinflamatorios no esteroideos, sulfasalazina y los inmunosupresores como ciclosporina, azatioprina y tacrolimus son compatibles con la lactancia (Dao, K. H. & Bermas, B. L., 2022).

En particular, la hidroxiclороquina está recomendada para todas las mujeres con LES durante el embarazo y lactancia, ya que contribuye a reducir la actividad de la enfermedad y a mejorar el pronóstico del embarazo (Liu, E., Liu, Z., & Zhou, Y., 2018). Este medicamento ofrece múltiples beneficios, tales como disminuir los brotes de la enfermedad, reducción de coágulos sanguíneos y la prevención de problemas cardíacos en el bebé (Tan, Y. et al., 2022). Asimismo, se aconseja continuar el uso de la prednisona a dosis bajas con el objetivo de disminuir la inflamación y controlar el LES en caso de que este sea requerido (Petri M. 2020).

Por el contrario, se debe evitar el metotrexato, dado que, aunque pasa solo en pequeñas cantidades a la leche, interfiere

con el metabolismo del ácido fólico, necesario para la formación de purinas. También es importante evitar micofenolato de mofetilo, ciclofosfamida y leflunomida durante la lactancia y el embarazo, en el caso de medicamentos biológicos, se tiene poca experiencia con su uso durante estos periodos y deberá siempre ser utilizado considerando riesgo-beneficio (Dao, K. H. & Bermas, B. L., 2022).

Medicamentos compatibles con la lactancia materna	Medicamentos con precaución durante la lactancia materna que deben evitarse	Medicamentos que muy pocos datos sobre la lactancia materna que deben evitarse durante la lactancia y que pueden interferir con el sistema inmunológico del bebé
- Hydroxychloroquine - Chloroquine - Sulfasalazine - Azathioprine - Cyclosporine - Tacrolimus - Prednisone - Immunoglobulin - ANCA non-steroidal - Corticosteroids	- Methotrexate - Mycophenolate DM - Cyclophosphamide - Leflunomide - ANCA antibodies of the IgG class, except intravenous	Biologics

Figura 5. Medicamentos para manejo del Lupus Eritematoso Sistémico y su relación con la lactancia materna (Bălănescu, A., Donisan, T., & Bălănescu, D., 2017). Elaboración propia.

Colaboración multidisciplinaria

El manejo de una mujer embarazada con enfermedades autoinmunes requiere la colaboración estrecha de un equipo multidisciplinario. Este grupo debe incluir las especialidades de Reumatología, Ginecología y Obstetricia, Medicina Materno Fetal y, según sea necesario, Nefrología o Cardiología Pediátrica, quienes desempeñan roles fundamentales en cada etapa del proceso (Dao, K. H., & Bermas, B. L., 2022).

Estos expertos son los responsables de identificar posibles contraindicaciones, calcular el riesgo individual del embarazo, analizar antecedentes obstétricos y factores de mal pronóstico, así como de evaluar la evolución clínica de la madre. Además, garantizan un seguimiento integral durante todo el embarazo, asegurando así la mejor atención para el binomio madre-hijo.



Figura 6. Manejo multidisciplinario en el embarazo de pacientes con Lupus Eritematoso Sistémico. https://www.tuotromedico.com/temas/embarazo_quinta_consulta.htm

Conclusiones

- El LES es una enfermedad autoinmune crónica que afecta principalmente a mujeres jóvenes en edad fértil.
- Durante el embarazo, pueden presentarse complicaciones materno-fetales como brotes, preeclampsia, parto prematuro, abortos, ruptura prematura de membranas, restricción del crecimiento intrauterino, lupus neonatal, problemas cardíacos.
- A pesar de estos riesgos, los avances en el manejo del LES durante el embarazo han mejorado significativamente los resultados para estas pacientes.
- Un enfoque multidisciplinario, que involucre distintas especialidades y un seguimiento cercano tanto del embarazo como de la enfermedad, es fundamental para reducir las complicaciones.

- Es posible lograr embarazos exitosos en pacientes con LES mediante una adecuada planificación, monitoreo constante, verificación de los medicamentos seguros para la madre y el bebé durante el embarazo y la lactancia, lo cual contribuye a garantizar un embarazo y puerperio sin complicaciones.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Agradecemos a todo el equipo que hizo posible este artículo y a la Facultad de Medicina por su apoyo.

Referencias

- Anderson P. O. (2019). Drugs for Lupus While Breastfeeding. *Breastfeeding medicine : the official journal of the Academy of Breastfeeding Medicine*, 14(10), 688–690. <https://doi.org/10.1089/bfm.2019.0232>
- Bălănescu, A., Donisan, T., & Bălănescu, D. (2017). An ever-challenging relationship: lupus and pregnancy. *Reumatologia*, 55(1), 29–37. <https://doi.org/10.5114/reum.2017.66685>
- Carrillo-Mora, P., García-Franco, A., Soto-Lara, M., Rodríguez-Vásquez, G., Pérez-Villalobos, J., & Martínez-Torres, D. (2021). Cambios fisiológicos durante el embarazo normal. *Revista de la facultad de medicina (Mexico)*, 64(1), 39-48.
- Clowse ME. Lupus activity in pregnancy. *Rheum Dis Clin North Am*. 2007 May;33(2):237-52, v. doi: 10.1016/j.rdc.2007.01.002.
- Dao, K. H., & Bermas, B. L. (2022). Systemic Lupus Erythematosus Management in Pregnancy. *International journal of women's health*, 14, 199–211. <https://doi.org/10.2147/IJWH.S282604>
- Dalal, D. S., Patel, K. A., & Patel, M. A. (2019). Systemic Lupus Erythematosus and Pregnancy: A Brief Review. *Journal of obstetrics and gynaecology of India*, 69(2), 104–109. <https://doi.org/10.1007/s13224-019-01212-8>
- Fisiología materna. Cunningham F, & Leveno K.J., & Bloom S.L., & Spong C.Y., & Dashe J.S., & Hoffman B.L., & Casey B.M., & Sheffield J.S. (2015) (Eds.), *Williams. Obstetricia*, 24e. McGraw-Hill Education
- Johnson, M. J., Petri, M., Witter, F. R., & Repke, J. T. (1995). Evaluation of preterm delivery in a systemic lupus erythematosus pregnancy clinic. *Obstetrics and gynecology*, 86(3), 396–399. [https://doi.org/10.1016/0029-7844\(95\)00186-U](https://doi.org/10.1016/0029-7844(95)00186-U)

Justiz Vaillant, A. A., Goyal, A., & Varacallo, M. A. (2023). Systemic Lupus Erythematosus. In StatPearls. StatPearls Publishing.

Merz, W. M., Fischer-Betz, R., Hellwig, K., Lamprecht, G., & Gembruch, U. (2022). Pregnancy and Autoimmune Disease. *Deutsches Arzteblatt international*, 119(9), 145–156. <https://doi.org/10.3238/arztebl.m2021.0353>

Mokbel, A., Geilan, A. M. & AboElgheit, S. (2013). Could women with systemic lupus erythematosus (SLE) have successful pregnancy outcomes? Prospective observational study. *The Egyptian Rheumatologist*, 35 (3), 133-139. <https://doi.org/10.1016/j.ejr.2013.02.002>

Liu, E., Liu, Z., & Zhou, Y. (2018). Feasibility of hydroxychloroquine adjuvant therapy in pregnant women with systemic lupus erythematosus. *Biomed Res-Tokyo*, 29, 980-3.

Petri M. (2020). Pregnancy and Systemic Lupus Erythematosus. Best practice & research. *Clinical obstetrics & gynaecology*, 64, 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2019.09.002>

Pons-Estel, G.J., & Pons-Estel, B.A. (2024). Lupus eritematoso sistémico. En A. von Domarus, P. Farreras, C. Rozman, F. Cardellach, J.M.^a Nicolás, R. Cervera, A. Agustí, R. Bataller, J. Brugada, J.M.^a Campistol, R. Carmena, A. Carreres, A. Castells, J. Castro, M.^a C. Cid, J. Dalmau, A. De La Sierra, J.C. Duró, M. Esteller, M.^aT. Estrach, X. Forns, J.M.^a Gatell, P. Ginès, R. Gomis, F. Gaus, J.M.^a Miró, S. Nogué, A. Prat, R. Pujol-Borrell, V. Rimbau, J.M.^a Ribera, Á. Urbano, E. Vieta, M. Vilardell, & A. Selva (Eds.), Farreras Rozman. *Medicina Interna* (20^a ed., pp. 1095-1103). ISBN 978-84-1382-486-4. <http://dxdoi.bibliotecabuap.elogim.com/10.1016/B978-84-1382-486-4.00131-1>

Salinas, M. Á. S., Cruz, A. B., Castañeda, A. R. C., Quezada, L. J. J., Arce-Salinas, C. A., Nemegyei, J. Á., ... & Castañeda, M. C. A. (2015). Guías de práctica clínica para la atención del embarazo en mujeres con enfermedades reumáticas autoinmunes del Colegio Mexicano de Reumatología. Parte I. *Reumatología clínica*, 11(5), 305-315

Smyth, A., Oliveira, G. H., Lahr, B. D., Bailey, K. R., Norby, S. M., & Garovic, V. D. (2010). A systematic review and meta-analysis of pregnancy outcomes in patients with systemic lupus erythematosus and lupus nephritis. *Clinical journal of the American Society of Nephrology : CJASN*, 5(11), 2060–2068.

Somers E. C. (2020). Pregnancy and autoimmune diseases. Best practice & research. Clinical obstetrics & gynaecology, 64, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2019.11.004>

Tan, Y., Yang, S., Liu, Q., Li, Z., Mu, R., Qiao, J., & Cui, L. (2022). Pregnancy-related complications in systemic lupus erythematosus. Journal of autoimmunity, 132, 102864. <https://doi.org/10.1016/j.jaut.2022.102864>

Yelnik, C. M., Laskin, C. A., Porter, T. F., Branch, D. W., Buyon, J. P., Guerra, M. M., Lockshin, M. D., Petri, M., Merrill, J. T., Sammaritano, L. R., Kim, M. Y., & Salmon, J. E. (2016). Lupus anticoagulant is the main predictor of adverse pregnancy outcomes in aPL-positive patients: validation of PROMISSE study results. Lupus science & medicine, 3(1), e000131. <https://doi.org/10.1136/lupus-2015-000131>

Zucchi, D., Elefante, E., Schilirò, D., Signorini, V., Trentin, F., Bortoluzzi, A., & Tani, C. (2022). One year in review 2022: systemic lupus erythematosus. Clinical and experimental rheumatology, 40(1), 4–14. <https://doi.org/10.55563/clinexprheumatol/nolysy>

Zucchi, D., Fischer-Betz, R., & Tani, C. (2023). Pregnancy in systemic lupus erythematosus. Best practice & research. Clinical rheumatology, 37(4), 101860. <https://doi.org/10.1016/j.berh.2023.101860>

Zucchi, D., Tani, C., & Mosca, M. (2024). Reproductive Health in RA, Lupus, and APS. Journal of clinical rheumatology : practical reports on rheumatic & musculoskeletal diseases, 30(7S Suppl 1), S42–S48. <https://doi.org/10.1097/RHU.0000000000002141>

MIDA SUS PALABRAS, JOVEN MATEMÁTICAS ENTRE CUERVOS Y ESCRITORIOS

MEASURE YOUR WORDS, YOUNG MAN
MATHEMATICS BETWEEN CROWS AND DESKS

Daniel Mocencahua Mora

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 32, 2025, pp. 64 - 71

Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

*Autor de correspondencia: daniel.mocencahua@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4718-7442>

RD-ICUAP

Resumen

Este artículo explora el clásico acertijo de Lewis Carroll, “¿En qué se parece un cuervo a un escritorio?”, desde una perspectiva matemática, en particular por medio de métricas de similitud y distancia entre palabras. Partiendo del juego literario y sus diversas respuestas, examinamos como conceptos matemáticos como la distancia de Hamming, la similitud de Jaccard, el coseno entre vectores y la distancia de Levenshtein permiten cuantificar relaciones entre palabras. Cada una de estas métricas, al medir diferencias y semejanzas, ofrece una aproximación numérica que aporta nuevos matices a la idea de similitud, a diferencia de las interpretaciones puramente literarias. El análisis se ilustra con una comparación entre las palabras “cuervo” y “escritorio”, demostrando cómo cada métrica arroja distintos grados de similitud. Finalmente, reflexionamos sobre la importancia de estos métodos en aplicaciones tecnológicas actuales, desde procesamiento del lenguaje natural hasta sistemas de recomendación, donde entender la “distancia” entre palabras y conceptos es esencial para personalizar y mejorar la interacción humana con la tecnología. Así, como en el acertijo de Carroll, este artículo muestra que, con el enfoque adecuado, es posible hallar conexiones entre ideas que parecían distantes.

Palabras clave: Similitud de palabras, Procesamiento del lenguaje natural, Análisis de texto, Cuervo y escritorio, Métricas de similitud.

Abstract

This article examines Lewis Carroll's classic riddle, "How does a raven resemble a desk?," from a mathematical standpoint, with a focus on metrics of similarity and distance between words. We will begin by examining the literary play and its various responses. We will then move on to examine how mathematical concepts such as Hamming distance, Jaccard similarity, cosine between vectors, and Levenshtein distance allow us to quantify relationships between words. Each of these metrics provides a numerical approach to measuring differences and similarities, offering a new level of detail and nuance to the concept of similarity beyond what can be achieved through purely literary interpretations. The analysis is illustrated with a comparison between the words "crow" and "desk," demonstrating how each metric yields different degrees of similarity. Finally, we consider the value of these methods in current technological applications, from natural language processing to recommender systems. Understanding the "distance" between words and concepts is essential to personalize and improve human interaction with technology. As demonstrated by Carroll's riddle, a suitable approach can reveal connections between seemingly disparate ideas.

Keywords: Word similarity, Natural language processing, Text analysis, Cuervo y escritorio, Similarity metrics.

Cuervo y escritorio

Alicia en el país de las maravillas es un libro que todos debemos leer algún día. En el capítulo 7 Alicia es cuestionada por el sombrerero con un acertijo que desde 1865 ha llamado la atención: Why is a raven like a writing-desk?

Desafortunadamente Alicia no logra dar la respuesta, y los demás dicen no saberla, ni siquiera el autor del libro, y no es hasta 1869, que Carroll da su solución: Because it can produce very few notes, though they are very flat; and it is never put with the wrong end in front.

Este acertijo se vuelve una desafío que algunos autores aceptaron: Because there's a b in both, and because there's an n in neither (Adous Huxley), Because the notes for which they are noted are not noted for being musical notes (Sam Loyd), las cuales pierden su gracia si se traducen (Gamero, 2014). Pero una respuesta que si se puede traducir es “porque sobre ambos escribió Edgar Allan Poe” (Igalada, 2009). En la figura 1 tenemos una red semántica del poema El cuervo de Poe que muestra una posible asociación entre nuestros palabras de interés.



Figura 1. Red semántica del poema El cuervo
Elaboración propia

Y ahora que la veo hasta se antoja una metáfora: “El cuervo es el guardián silencioso de los secretos que yacen en el escritorio.”

Pero volvamos a lo nuestro. Si

traducimos la pregunta literalmente obtendríamos algo como ¿por qué un cuervo es como un escritorio? y así cobran sentido las respuestas mostradas. En español se traduce generalmente como “¿en qué se parece un cuervo a un escritorio?” (Carroll, 2003, p. 63)

Con estas dos traducciones podemos abordar la pregunta desde dos enfoques: que tienen en común ambas palabras, o que tanto que se parecen. En lugar de buscar una respuesta puramente ingeniosa, exploremos cómo la matemática puede ofrecernos un enfoque alternativo.

Como matemático no puedo dar una respuesta literaria ingeniosa al acertijo, pero los enfoques mencionados me conducen a considerar los concepto de medidas y similitudes. Me atrevo a pensar en las palabras como puntos en un espacio específico, o como conjuntos, y por lo tanto pienso en medidas de distancia para el primer caso o similitud para el segundo.

Notemos que la distancia es una medida de diferencia, mientras que la similitud es una medida de parecido. Y hay una relación interesante: a mayor distancia, menor similitud. Creo que por ese camino vamos a llegar a algo.

Con la vara que midas...

Empecemos contando las letras: cuervo (6), escritorio (10), la diferencia en longitud es evidente, pero no es lo que buscamos. ¿Cuántas letras distintas tiene cada una? cuervo (6), escritorio (7), siguen siendo diferentes en eso, pero ¿qué tan iguales son? Esto de centrarnos en las letras nos va a servir ahora.

Hamming

Hacemos lo siguiente: alineamos las palabras y vemos donde coinciden las letras. A esto se le llama distancia de Hamming, la podemos apreciar en la Figura 2.

Distancia de Hamming

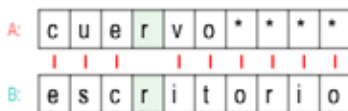


Figura 2. Distancia de Hamming
Elaboración propia

Hay 9 diferencias, marcadas con rojo, es decir, para Hamming, estas palabras son muy diferentes. Hemos completado la cadena de la palabra “cuervo” con asteriscos porque Hamming solo se puede aplicar a cadenas de igual longitud. Nota que, si sus diferencias son 9 de 10, su similitud es $1/9 \sim 0.11$.

Jaccard

Si vemos nuestras palabras como conjuntos podemos usar medidas de similitud como la de Jaccard (j), que definimos para conjuntos A y B por

$$j(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

Cabe mencionar que aclarar que $|A \cap B|$ representa el número de letras comunes y $|A \cup B|$ el número de letras únicas combinadas (Kannan et al., 2016, p. 63).

Es decir, contamos cuantas letras (distintas) tienen en común (4) y dividimos entre el total de letras distintas que juntan ambas palabras (9). Si A es el conjunto de las letras de “cuervo” y B el conjunto de letras de la palabra “escritorio” tenemos

$$j(\text{cuervo}, \text{escritorio}) = j(A, B) = \frac{4}{9} = 0.44$$



Figura 3. Similitud de Jaccard
Elaboración propia

Coseno

Ya que andamos metiendo números hagamos lo siguiente: asociemos cada letra con su lugar en el abecedario, por ejemplo “a” estaría asociada con el 1, “b” con el 2 y así sucesivamente. Esto nos permite convertir nuestras palabras en vectores, como se ve en la tabla 1.

Palabra	Vector	Vector en 10 lugares
Cuervo	(3, 21, 5, 18, 22, 15)	$x = (3, 21, 5, 18, 22, 15, 0, 0, 0, 0)$
Escritorio	(5, 19, 3, 18, 9, 20, 15, 18, 9, 15)	$y = (5, 19, 3, 18, 9, 20, 15, 18, 9, 15)$

Tabla 1. Las palabras convertidas a vectores, agregamos ceros para igualar longitudes.

Ahora podemos usar la similitud entre vectores del coseno, la cual se define para dos vectores x, y por

$$d(x, y) = \frac{x \cdot y}{\|x\| \|y\|}$$

Esta fórmula nos mide el coseno del ángulo entre los vectores x, y , (cosas de álgebra lineal, ya sabes).

Este valor está entre -1 y 1, pero en nuestro caso particular es

$$d(x, y) = \frac{x \cdot y}{\|x\| \|y\|} = \frac{(3, 21, 5, 18, 22, 15) \cdot (5, 19, 3, 18, 9, 20, 15, 18, 9, 15)}{\sqrt{3^2 + 21^2 + 5^2 + 18^2 + 22^2 + 15^2} \sqrt{5^2 + 19^2 + 3^2 + 18^2 + 9^2 + 20^2 + 15^2 + 18^2 + 9^2 + 15^2}} = 0.7106$$

lo cual da como resultado 0.7106. La figura 4 ilustra esta idea.



Figura 4. Similitud del Coseno
Elaboración propia

El número obtenido es el coseno del ángulo entre los dos vectores, si es cercano a cero los vectores son perpendiculares. Un valor cercano a cero indicaría que los vectores son completamente distintos en dirección, mientras que un valor cercano a uno indica que están casi alineados, o

que tienen alta similitud.

Levenshtein

Esta medida es un poco más complicada. Se le conoce como medida de la edición pues cuenta las operaciones, entre agregados, eliminaciones o cambios, para pasar de una palabra a otra (Rodríguez, 2020). Para eso generamos una matriz con la palabra “cuervo” en las filas y “escritorio” en las columnas. En la imagen figura 5 se muestra el proceso que se sigue a continuación.

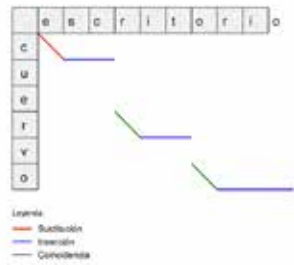


Figura 5. Distancia de Levenshtein
Elaboración propia

La distancia L de Levenshtein es 8, que representa el número mínimo de operaciones (sustituciones, inserciones o eliminaciones) necesarias para transformar “cuervo” en “escritorio”.

Por Cáceres (año) sabemos que $0 \leq L \leq |A| + |B|$. En este caso tenemos que $|A|=6$ y $|B|=10$ y con esto podemos valorar la similitud como $8/16=0.5$

Nota que, a diferencia de Hamming, aquí las palabras pueden ser de distinta longitud.

En resumidas cuentas

Determinemos la bondad de los números encontrados con esta escala con la tabla 2.

Valor	Similitud
$v=1$	Perfecta
$0.8 \leq v < 1$	Muy alta

Valor	Similitud
$0.6 \leq v < 0.8$	Alta
$0.4 \leq v < 0.6$	Moderada
$0.2 \leq v < 0.4$	Baja
$0 \leq v < 0.2$	Muy baja
$v=0$	Nula

Tabla 2. Escala de valoración de las medidas de similitud

Ahora recordemos lo que obtuvimos:

Métrica	Valor obtenido	Similitud
Hamming	0.11	Muy baja
Jaccard	0.44	Moderada
Coseno	0.71	Alta
Levenshtein	0.5	Moderada

Tabla 3. Resumen de medidas

Fijate como, a través de diferentes métricas, observamos distintos grados de similitud entre las palabras, lo que implica que la elección de la métrica afecta nuestra percepción de “similitud”.

Así que a la pregunta ¿qué tanto se parece la palabra “cuervo” a “escritorio”? podemos responder un poco como los biólogos y decir “depende de la métrica”, ya que la similitud va de moderada a alta. Podemos deducir, tal como lo haríamos con las respuestas literarias, que son palabras que tienen algo en común.

¿Y todo para qué?

Es posible que, al resolver el acertijo, una respuesta matemática parezca menos divertida que una respuesta ingeniosa. Sin embargo, métricas como Hamming, Jaccard, Coseno y Levenshtein tienen un papel fundamental en muchas aplicaciones actuales: cuando interactuamos con nuestros teléfonos, utilizamos servicios de recomendación en redes sociales o buscamos información en internet, estos algoritmos comparan textos, analizan patrones y encuentran similitudes que personalizan nuestra experiencia. Y esto no termina aquí.

Cada distancia que calculamos en este artículo refleja, en alguna medida, las formas en que las máquinas comprenden palabras, significados y hasta nuestras intenciones. Por ejemplo, en la frase “El cuervo es el guardián silencioso de los secretos que yacen en el escritorio”, la distancia semántica entre “cuervo” y “escritorio” es mínima porque están relacionados en un contexto específico. Matemáticamente, se podría calcular esta cercanía usando técnicas de modelado

de lenguaje como word embeddings, que asignan a cada palabra un vector numérico basado en su contexto, permitiendo medir su proximidad en términos de significado. La distancia semántica tiene amplias aplicaciones: desde mejorar motores de búsqueda (Jalal et al., 2022) y asistentes virtuales (Ramos Alvarez et al., 2024), hasta facilitar la traducción automática y el análisis de sentimientos (Nuñez-Prado et al., 2323). Cada una de estas tecnologías utiliza el contexto para acercar significados y ofrecer resultados más relevantes (Larraz et al., 2023).

Aunque “cuervo” y “escritorio” pueden parecer distintos a primera vista, para la inteligencia artificial es esencial identificar las relaciones entre conceptos para hacer asociaciones más humanas.

Al final, como en el acertijo de Carroll, lo importante es que siempre podemos hallar algo en común si miramos desde el ángulo adecuado, y las matemáticas nos dan la perspectiva para hacerlo.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Referencias

- Carrol, L. (2003). Alicia en el país de las maravillas. Ediciones del sur. <https://www.ucm.es/data/cont/docs/119-2014-02-19-Carroll.AliciaEnElPaisDeLasMaravillas.pdf>
- Gamero, A. (2014, abril 4). ¿En qué se parece un cuervo a un escritorio? [Blog]. La piedra se Sísifo. Gabinete de curiosidades. <https://lapiedradesisifo.com/2014/04/06/en-qu%C3%A9-se-parece-un-cuervo-a-un-escritorio/>
- Igualada, J. (2009, enero 31). Solución al acertijo [Blog]. Mil matices de gris. <https://milmaticesdegris.blogspot.com/2009/01/solucion-al-acertijo.html>
- Jalal, A. A., Jasim, A. A., & Mahawish, A. A. (2022). A web content mining application for detecting relevant pages using Jaccard similarity. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 12(6), 6461. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i6.pp6461-6471>
- Kannan, S., Karuppusamy, S., Nedunchezian, A., Venkateshan, P., Wang, P., Bojja, N., & Kejariwal, A. (2016). Big Data Analytics for Social Media. En *Big Data* (pp. 63–94). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805394-2.00003-9>
- Larraz, I., Míguez, R., & Sallicati, F. (2023). Semantic similarity models for automated fact-checking: ClaimCheck as a claim matching tool. *El Profesional de la información*, e320321. <https://doi.org/10.3145/epi.2023.may.21>
- Nuñez-Prado, C.-J., Talavera Ortega, C., Chanona-Hernández, L., & Sidorov, G. (2323). Aplicación de algoritmos de aprendizaje automático sobre un corpus depresivo digital. *Research in Computing Science*, 152(8), 89–98. https://racs.cic.ipn.mx/2023_152_8/Aplicacion%20de%20algoritmos%20de%20aprendizaje%20automatico%20sobre%20un%20corpus%20depresivo%20digital.pdf
- Ramos Alvarez, J. I., Torres, R. V., Segarra Faggioni, V., & Pinza Tapia, E. I. (2024). Creación de distractores para preguntas de opción múltiple mediante técnicas de incrustación (Word Embedding). *Revista Tecnológica - ESPOL*, 36(2), 95–110. <https://doi.org/10.37815/rte.v36n2.1161>
- Rodríguez, D. (2020, junio 17). La distancia de Levenshtein [Analytics Lane]. Ciencia de datos. <https://www.analyticslane.com/2020/06/17/la-distancia-de-levenshtein>

AGUA Y VEGETALES VEMOS, PERO BACTERIAS, NO SABEMOS

WATER AND VEGGIES WE SEE, BUT BACTERIA ROAM FREE

Ramiro José González Duarte¹, Verna
Cázares Ordoñez¹, Alí Alessandra
Mota De la Rosa², Jesús Rafael
Ramos Ortega², Karla Elena Gutiérrez
Salazar²

Centro Universitario de la Salud, Complejo Regional Nororiental,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Arias y Blvd. s/n, El
Carmen, C.P. 73800, Teziutlán, Puebla. (1) Docente e investigador, (2)
Estudiante de Medicina General y Comunitaria.

*Autor de correspondencia: ramiro.gonzalezd@correo.buap.mx
verna.cazares@correo.buap.mx, mr202340381@alm.buap.mx,
ro202352564@alm.buap.mx, gs202344991@alm.buap.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6041-9888>
<https://orcid.org/0000-0003-3564-0369>
<https://orcid.org/0009-0005-7545-807X>
<https://orcid.org/0009-0004-0475-2557>
<https://orcid.org/0009-0007-7886-4211>

Recibido: 5 de Noviembre 2024

Revisado: 30 junio 2025

Publicado: 30 de Agosto 2025

Resumen

Las enterobacterias constituyen una amplia familia de bacterias que habitan principalmente en el tracto gastrointestinal de humanos y animales, y algunas pueden causar enfermedades. Dentro de este grupo, las bacterias coliformes se utilizan como indicadores de la calidad del agua, ya que su presencia sugiere contaminación fecal y posibles riesgos para la salud. El consumo de agua contaminada con estas bacterias puede provocar infecciones intestinales de diversa gravedad. El consumo de alimentos vegetales que fueron cultivados con el uso de aguas residuales también representa un riesgo para las personas. Por lo anterior, es importante concientizar a la población sobre la importancia de la vigilancia de la calidad microbiológica del agua. Mediante una actividad científica con estudiantes de la licenciatura de Medicina General y Comunitaria, utilizamos el sistema de placas petrífilm de 3M para la detección de enterobacterias y bacterias coliformes en diversas muestras de agua y de alimentos vegetales de la región de Teziutlán, Puebla y compartimos nuestras observaciones, producto de la curiosidad, para divulgación científica del tema.

Palabras clave: enterobacterias, bacterias coliformes, calidad del agua, contaminación, salud pública.

Abstract

Enterobacteria make up a large family of bacteria that primarily inhabit the gastrointestinal tract of humans and animals, and some can cause diseases. Within this group, coliform bacteria are used as indicators of water quality, as their presence suggests fecal contamination and potential health risks. Consuming water contaminated with these bacteria can lead to intestinal infections of varying severity. Additionally, eating plant-based foods grown using untreated wastewater poses a health risk. Therefore, it is essential to raise public awareness about the importance of monitoring the microbiological quality of water. Through a scientific activity with undergraduate students from the General and Community Medicine program, we used the 3M Petrifilm system to detect enterobacteria and coliform bacteria in various samples of water and plant-based foods from the Teziutlán region in Puebla. We are sharing our observations, born out of curiosity, to promote scientific understanding of this topic.

Keywords: enterobacteria, coliform bacteria, water quality, contamination, public health

Una pequeña introducción al gran mundo de las bacterias.

Las bacterias representan las formas de vida celular más antiguas y versátiles en el planeta Tierra. Son microorganismos procariotas, lo que significa que son células relativamente simples, sin núcleo ni organelos, a diferencia de las células eucariotas de los animales, las plantas y los hongos, que sí tienen núcleo y organelos. Lo anterior significa que entre las características más distintivas de las bacterias está la ausencia de una membrana nuclear, mitocondrias, aparato de Golgi, retículos endoplasmáticos, etc. Por otro lado, tienen una pared celular que les da protección y las hace resistentes al ambiente. Esta simplicidad estructural les ha permitido adaptarse a una diversidad de hábitats, desde ambientes extremos como géiseres y glaciares, hasta el organismo humano.

Las bacterias se dividen en dos grupos principales de acuerdo con la estructura de su pared celular: Gram positivas y Gram negativas. Esto se basa en una técnica de tinción que nos permite, literalmente, colorear a las bacterias en el laboratorio. Fue descrita en 1884 por el bacteriólogo danés Christian Gram (1853-1938) y, en su honor, se mantiene ese nombre para designar a las bacterias por su coloración al realizar la técnica. Las bacterias Gram positivas quedan de color morado o violeta, mientras que las Gram negativas quedan de color rosado o rojo. Las bacterias Gram positivas tienen una pared celular gruesa compuesta principalmente de peptidoglucano, un polímero que otorga rigidez y protección contra el ambiente.

Las Gram negativas, por otro lado, tienen una capa de peptidoglucano más delgada, acompañada de una membrana externa compuesta de lipopolisacáridos, los cuales actúan como endotoxinas en muchos casos, causando reacciones inflamatorias en los organismos infectados (Lorinsky & Ryan, 2024). Hay que mencionar que hay algunas excepciones. Las peculiares bacterias

conocidas como micoplasmas carecen completamente de pared celular y tienen otros mecanismos para sobrevivir en diversos ambientes y en las células de un organismo hospedador, algunos son causantes de enfermedades graves (Yáñez et al., 1999). Para la clasificación de las bacterias se consideran diversos criterios morfológicos y estructurales, como el tamaño (que puede variar de 1 a 20 micrómetros o más), la forma: cocos, bacilos, espirilos, y su distribución en el espacio (cadenas, racimos, parejas o células aisladas). La clasificación más avanzada utiliza además características basadas en el ADN y el ARN de las bacterias, para tener una identificación lo más precisa posible.

A pesar de su simplicidad, las bacterias pueden realizar procesos bioquímicos complejos y adaptarse rápidamente a cambios en el entorno. La diversidad bacteriana en el organismo humano incluye desde especies beneficiosas que contribuyen a la salud hasta patógenos potencialmente mortales, capaces de causar enfermedades mediante la producción de toxinas o la invasión de áreas normalmente estériles del cuerpo (Murray et al., 2021).

Si es diarrea, puede ser por enterobacterias

Las enterobacterias (de la familia Enterobacteriaceae) constituyen un grupo heterogéneo y diverso de bacterias Gram negativas, de gran importancia ambiental y en medicina. Son bacilos que pueden ser móviles, gracias a la presencia de flagelos que les sirven como látigos para desplazarse, o inmóviles. Se les encuentra en hábitats muy variados, desde el suelo y el agua hasta el intestino de humanos y animales, donde algunas especies forman parte de la microbiota intestinal normal, mientras que otras son "malvadas" y se denominan patógenas porque pueden causar enfermedades gastrointestinales (Ryan, 2022).

Estas bacterias son aerobias facultativas, lo que significa que no dependen del oxígeno y son capaces de desarrollarse en ausencia de ese gas atmosférico

mediante la fermentación de la glucosa, proceso en el que algunas especies producen gas (recuerden este dato porque lo mencionaremos más adelante). Un rasgo fundamental de las enterobacterias es su capacidad de producir endotoxinas, sustancias tóxicas que forman parte de la membrana externa de las bacterias Gram negativas y que, al ser liberadas en el organismo huésped, pueden causar fiebre, inflamación y, en casos graves, choque séptico.

Además, algunas enterobacterias producen exotoxinas que afectan directamente a las células del hospedador, pudiendo dañar membranas celulares, inhibir la síntesis de proteínas o alterar rutas metabólicas. Estas acciones pueden provocar efectos graves en el organismo, desde la muerte celular (por acción de citotoxinas) hasta alteraciones fisiológicas como diarreas o infecciones urinarias. La familia Enterobacteriaceae abarca numerosos géneros bacterianos clínicamente importantes, como *Escherichia*, *Salmonella*, *Shigella*, *Klebsiella* y *Yersinia*. Pueden parecer nombres raros, pero son de los que vale la pena recordar.

Aproximadamente entre veinte y veinticinco especies son de relevancia médica, y se asocian con infecciones intestinales, respiratorias, urinarias y sistémicas. Por ejemplo, *Escherichia coli* es una de las especies más comunes en la microbiota intestinal humana y es generalmente inofensiva en el intestino; sin embargo, ciertas cepas como la terrible *E. coli* O157 pueden producir toxinas que causan colitis hemorrágica y síndrome urémico hemolítico que pueden provocar la muerte del paciente infectado (Riedel et al., 2020).

Ahora sabemos que el alcance global de las enterobacterias es mucho más amplio de lo que se pensaba anteriormente, ya que desempeñan roles importantes en el medio ambiente, a través de su amplia distribución ambiental mediante vectores como insectos. En humanos, se han descrito muchas especies nuevas, algunas asociadas con procesos específicos de enfermedades. Algunas especies ya conocidas ahora se observan

en nuevos escenarios y síndromes de enfermedades infecciosas. Por lo anterior, siguen siendo ampliamente estudiadas (Janda & Abbott, 2021). Para conocer más datos sobre las enterobacterias de relevancia médica presentamos la tabla 1

Tabla 1. Principales enterobacterias de importancia médica.

Enterobacteria	Esquema de fermentación	Tratamiento	Enfermedad asociada
<i>Escherichia coli</i>	Variable, fermenta lactosa y glucosa, produce gas	Antibióticos, hidratación	Diarrea, síndrome urémico hemolítico, síndrome de intestino irritable
<i>Salmonella</i>	Variable, fermenta lactosa y glucosa, produce gas	Antibióticos, hidratación	Salmonelosis, síndrome de intestino irritable
<i>Shigella</i>	Variable, fermenta lactosa y glucosa, produce gas	Antibióticos, hidratación	Disentería, síndrome de intestino irritable
<i>Klebsiella</i>	Variable, fermenta lactosa y glucosa, produce gas	Antibióticos, hidratación	Neumonía, síndrome urémico hemolítico
<i>Yersinia</i>	Variable, fermenta lactosa y glucosa, produce gas	Antibióticos, hidratación	Yersinia enterocolitica, síndrome de intestino irritable
<i>Enterobacter</i>	Variable, fermenta lactosa y glucosa, produce gas	Antibióticos, hidratación	Neumonía, síndrome urémico hemolítico
<i>Serratia</i>	Variable, fermenta lactosa y glucosa, produce gas	Antibióticos, hidratación	Neumonía, síndrome urémico hemolítico
<i>Acetivibrio</i>	Variable, fermenta lactosa y glucosa, produce gas	Antibióticos, hidratación	Neumonía, síndrome urémico hemolítico
<i>Citrobacter</i>	Variable, fermenta lactosa y glucosa, produce gas	Antibióticos, hidratación	Neumonía, síndrome urémico hemolítico
<i>Enterobacteriaceae</i>	Variable, fermenta lactosa y glucosa, produce gas	Antibióticos, hidratación	Neumonía, síndrome urémico hemolítico

*Infección intrahospitalaria implica el contagio de un individuo dentro de un hospital por el contacto con pacientes infectados o sus secreciones, personal médico, dispositivos médicos, fluidos intravenosos o catéteres permanentes.

Bacterias coliformes: indicadores de la calidad del agua.

Las bacterias coliformes son un subgrupo de las enterobacterias que actúan como indicadores microbiológicos en el monitoreo de la calidad del agua (Venegas et al., 2023). Estas bacterias se encuentran ampliamente en el ambiente,

en el suelo, en el agua y en la vegetación. La presencia de algunos tipos de bacterias coliformes en el agua señala la presencia de excremento o desechos de alcantarillas. Los organismos que causan enfermedades usualmente vienen de los excrementos de humanos o de animales y los desechos de alcantarillas (figura 1). Las bacterias coliformes se clasifican en dos categorías principales: coliformes totales y coliformes fecales.



Figura 1. Las bacterias coliformes, subgrupo de enterobacterias utilizadas como indicadores de calidad del agua, se encuentran en suelos, agua y vegetación. Su detección en el agua puede indicar contaminación por desechos fecales o de alcantarillas. Existen dos principales tipos: coliformes totales y coliformes fecales, siendo estos últimos asociados específicamente a excremento humano o animal.

Coliformes Totales: las bacterias coliformes totales habitan principalmente en el medio ambiente y que suelen ser inofensivas. Este grupo incluye géneros como *Citrobacter*, *Enterobacter* y algunas especies de *Klebsiella*. La presencia de coliformes totales en el agua sugiere contaminación general, pero no necesariamente una fuente fecal; por lo tanto, su detección puede indicar la necesidad de una vigilancia más detallada para garantizar la potabilidad del agua.

Coliformes Fecales: las bacterias coliformes fecales son un subgrupo de coliformes más específico, compuesto en su mayoría por *Escherichia coli*. Estas bacterias se encuentran en grandes cantidades en el tracto intestinal de humanos y animales, y su presencia en el agua es una señal de contaminación fecal reciente. Esto tiene implicaciones importantes para la salud pública, ya que la presencia de coliformes fecales en el agua potable indica un riesgo potencial

de enfermedades transmitidas por el agua, como la diarrea, la fiebre tifoidea y la disentería bacilar.

La importancia de vigilar la calidad microbiológica del agua.

El monitoreo de las bacterias coliformes es una práctica esencial en el control de la calidad del agua y en la protección de la salud pública (Fábrega et al., 2022). La detección de coliformes totales y fecales en fuentes de agua, especialmente en agua potable, sirve como un indicador confiable de contaminación y riesgo sanitario (Estigarribia et al., 2023). Esta evaluación se realiza comúnmente mediante métodos microbiológicos en laboratorio y existen diversos procedimientos reportados internacionalmente. La herramienta básica son los cultivos de bacterias en medios a base de agar (un tipo de material de consistencia más rígida que una gelatina) o el uso de sistemas comerciales de detección rápida.

La importancia de vigilar la presencia de bacterias coliformes en el agua radica en que su detección permite prevenir y controlar brotes de enfermedades de origen hídrico. Cuando se encuentran coliformes fecales en el agua potable, se deben implementar medidas correctivas inmediatas, como la desinfección y el monitoreo continuo, para garantizar la seguridad del suministro de agua. Además, los sistemas de tratamiento de aguas residuales y potables deben diseñarse y mantenerse de acuerdo con normas estrictas para reducir la posibilidad de contaminación fecal y proteger a las poblaciones de infecciones (Jara-Vilca, 2023).

Nuestra experiencia en el laboratorio de microbiología.

Con nuestros estudiantes de la licenciatura de Medicina General y Comunitaria, de la asignatura de Agentes biológicos del periodo de otoño 2024, se nos ocurrió analizar muestras de agua de diferente procedencia de la región de Teziutlán, que es donde se ubica nuestra sede universitaria: el Centro Universitario de la Salud (CUS) de la BUAP. Decidimos utilizar un sistema bien estandarizado, fácil y rápido para nuestros experimentos exploratorios, basados en la curiosidad de analizar las muestras de agua. Por lo anterior, utilizamos un sistema de detección rápida y elegimos las placas Petrifilm de la empresa 3M, y específicamente las placas para coliformes y el sistema para enterobacterias. Seguimos las instrucciones del fabricante y analizamos un mililitro (1 mL) de las muestras de agua, para después incubar las placas petrifilm en una incubadora para bacterias a 37 °C durante 24 horas. Evaluamos muestras de agua de diversas fuentes para conocer la cantidad de enterobacterias y de bacterias coliformes que pudieran tener.

Mostramos algunos ejemplos de nuestros resultados obtenidos con el sistema de placas petrifilm (figuras 2 y 3). En la figura 2, panel A, podemos ver una enorme cantidad de enterobacterias de origen intestinal (fecal) que estaban presentes en el agua de un manantial de la región (se ven como puntitos rojos). Se nota el cambio de coloración del rojo original de la placa petrifilm a amarillo, debido al cambio de pH a ácido y que fue producto del crecimiento de las bacterias y la fermentación de carbohidratos presentes en el medio de cultivo. En el panel B de esa misma figura podemos ver muchas colonias de enterobacterias, algunas con pequeñas burbujas que indican la producción de gas por la fermentación bacteriana y un cambio de color a amarillo, por la producción de ácido. Esto sucedió con la muestra de agua de la llave que trajo un estudiante de su casa. En el panel C, vemos lo obtenido con el agua de una taza de baño (WC) de mujeres

de uno de los sanitarios de nuestra sede escolar. Podemos ver también varias colonias de enterobacterias, las burbujitas que indican producción de gas y un ligero cambio de pH por el ácido que produjeron las bacterias. En este caso el cambio de pH se ve principalmente alrededor de las colonias bacterianas. Finalmente, en el panel D mostramos el resultado de una placa donde evaluamos agua obtenida de una purificadora de agua local. En ese caso no hubo crecimiento de colonias de bacterias coliformes, como sería esperado si se cumplen con las normas sanitarias y las buenas prácticas de procesamiento y purificación del agua para que sea apta para el consumo humano, desde el punto de vista microbiológico.

Algo que queremos destacar en este punto es cómo la cantidad de bacterias depende de la fuente del agua analizada. En el caso del manantial, aunque parecía limpia no podíamos imaginar que contenía una enorme cantidad de bacterias de origen intestinal de animales y de humanos, que representan un potencial riesgo para la salud. Sabemos que hay gente de la región que la consume directamente, pensando que está limpia por su origen, pero que no imaginan que se puede contaminar por contacto con aguas negras o por directamente el contacto con heces de animales y humanos de regiones aledañas.}

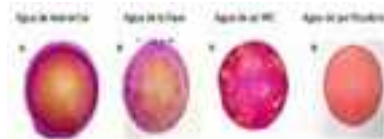


Figura 2. Resultados de la evaluación de enterobacterias y coliformes en muestras de agua de diversas fuentes mediante el sistema de placas Petrifilm (3M). (A) Agua de manantial: alta densidad de enterobacterias de origen fecal, visible como puntos rojos y cambio de color de la placa a amarillo debido a la fermentación y producción de ácido. (B) Agua de llave: crecimiento de enterobacterias con burbujas indicativas de fermentación y cambio a amarillo por producción de ácido. (C) Agua de taza de baño (WC): presencia de enterobacterias con burbujas de gas y cambio local a amarillo por producción de ácido. (D) Agua purificada: sin crecimiento bacteriano en la placa para coliformes totales, indicando cumplimiento de estándares microbiológicos de calidad.

Evaluamos otra muestra de agua de otra purificadora de la región y los resultados no fueron tan buenos como en la anterior. Cuando el sistema de purificación del agua no es el adecuado pueden pasar situaciones como las que mostramos en el panel A de la figura 3. En ese caso encontramos algunas bacterias coliformes productoras de gas en una muestra de agua de una purificadora local. Esto fue algo que nos sorprendió, no lo hubiéramos esperado, ni deseado, pero nos indica la razón por la cual debe haber una vigilancia de la calidad del agua de las empresas purificadoras regionales y de sus sistemas de purificación. Todo esto para garantizar su venta para consumo humano y evitar el posible brote de una enfermedad gastrointestinal entre la población. Por otro lado, en esa misma figura mostramos lo que sucedió cuando analizamos el agua del enjuagado de algunos vegetales comúnmente consumidos en México: el cilantro, perejil y la espinaca. Ese tipo de vegetales generalmente requieren del riego y desafortunadamente suele utilizarse para ello aguas residuales sin tratamiento previo, las también conocidas como “aguas negras”, que implican la presencia de heces de origen animal y humano y de otros contaminantes químicos tóxicos. Realmente nos sorprendió ver la enorme cantidad de enterobacterias presentes en esos vegetales (paneles B al C). Para ello los dejamos remojoando cinco minutos en solución salina isotónica estéril, cada uno de manera independiente, y de ese líquido utilizamos 1 mililitro (1 mL) para su evaluación con las placas petrífilm. Podemos ver en el panel B el cambio de color y la gran cantidad de colonias de bacterias provenientes del cilantro. En el panel C observamos bacterias productoras de gas y fermentadoras que estaban en el perejil. En el panel D, fue tan grande la cantidad de enterobacterias en el líquido del enjuague de la espinaca que prácticamente el color de toda la placa se amarilló. De hecho, en ese caso el fabricante indica que la interpretación se denomina como bacterias incontables. Lo anterior nos presentó evidencia de la presencia de enterobacterias en dichos alimentos frescos que probablemente fueron regados con aguas negras, y que, por lo tanto, es necesario lavarlos y desinfectarlos en el hogar para poder consumirlos de manera segura y evitar así el riesgo de contraer

una enfermedad gastrointestinal.



Figura 3. Análisis microbiológico de muestras de agua y enjuague de vegetales frescos con el sistema de placas petrífilm 3M para coliformes y enterobacterias. (A) Agua de purificadora: presencia inesperada de bacterias coliformes productoras de gas, subrayando la importancia de vigilar la calidad del agua para consumo humano. (B-D) Enjuagues de vegetales: alta carga de enterobacterias en cilantro, perejil y espinaca, probablemente por riego con aguas contaminadas; el cambio de coloración a amarillo y gas en las placas indican fermentación y una cantidad significativa de bacterias fecales, siendo "incontables" en espinaca. Esto resalta la importancia de desinfectar vegetales antes de su consumo para prevenir enfermedades gastrointestinales.

Aguas residuales y agricultura: una terrible realidad.

El uso de aguas residuales en la agricultura representa un problema crítico debido a los riesgos de contaminación microbiana y la degradación de los suelos. Aunque el uso de agua residual "tratada" sería la opción ideal, en muchas regiones del mundo, incluyendo México, se emplean aguas residuales sin tratamiento alguno. Por ejemplo: la Ciudad de México genera grandes cantidades de agua residual y es considerada como una de las mayores productoras de la misma en todo el mundo, además de proveerla a sus estados vecinos. Esta práctica tiene consecuencias significativas a mediano y largo plazo, como la degradación del suelo y la contaminación con microorganismos patógenos, como enterobacterias, que son capaces de contaminar vegetales y representar un riesgo para la salud pública (Mancilla-Villa et al., 2022). Lamentablemente, para muchos agricultores en zonas marginadas, el uso de aguas residuales sin tratamiento es, en realidad, la única opción hídrica disponible para mantener sus cultivos. Sin embargo, esta práctica genera riesgos asociados tanto a la seguridad alimentaria como

a la salud de los consumidores. Un problema adicional es la falta de registros y monitoreo detallado de los volúmenes y áreas de riego que emplean estas aguas, lo cual dificulta implementar mejoras y mitigar riesgos en el uso de aguas residuales (Mendoza-Retana et al., 2021). La producción de aguas residuales en países de América Latina y el Caribe no siempre es monitoreada regularmente. Se calcula que se generan anualmente al menos 30 kilómetros cúbicos de aguas residuales. Brasil y México producen juntos más de la mitad del agua residual generada en la región, lo cual subraya la necesidad urgente de supervisar y tratar esta agua antes de usarla en la agricultura (Mahlknecht et al., 2020). El empleo de aguas residuales en la agricultura, dependiendo de su nivel de tratamiento, puede ser un vehículo para la transmisión de patógenos como virus, bacterias y protozoos, lo que implica un riesgo directo para la salud pública (Chahal et al., 2016). En Sudáfrica, un estudio detectó una alta contaminación en vegetales regados con aguas residuales sin tratar, encontrando bacterias patógenas como *Escherichia coli*, *Shigella* spp. y *Salmonella* spp., las cuales representan un riesgo para los consumidores (Ajibade & Ifeanyin, 2017). Estos estudios resaltan la importancia de aplicar un tratamiento adecuado a las aguas residuales antes de su uso agrícola. Sin tratamiento, estas aguas

pueden transportar enterobacterias y otros microorganismos patógenos que contaminan cultivos frescos, afectando la inocuidad de los alimentos y representando una amenaza significativa para la salud pública.

Conclusión

Las bacterias coliformes, especialmente las fecales, son uno de los indicadores más confiables de contaminación en fuentes de agua potable y constituyen una herramienta fundamental en la vigilancia de la calidad del agua. El consumo de agua contaminada por bacterias coliformes puede causar múltiples enfermedades intestinales, siendo en la actualidad un problema latente. Por lo anterior, el monitoreo y el control de estas bacterias son imprescindibles para reducir el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua y garantizar el bienestar de la población. Conocer y entender la naturaleza de las enterobacterias y las bacterias coliformes no solo es relevante en microbiología y salud pública, sino que también nos ayuda a mejorar las prácticas de saneamiento y gestión del agua, contribuyendo así a la prevención de enfermedades y a la protección de la salud humana.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando

disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Agradecemos a la BUAP por promover la investigación científica, a la VIEP por el apoyo recibido en el programa de Proyectos de Grupos de Investigación Interdisciplinaria 2024 (ID de Grupo: 00089) y Haciendo Ciencia en la BUAP 2024. También al ASPABUAP por el apoyo de superación académica para adquirir los materiales que utilizamos (Placas petrifilm 3M) con fines de investigación y divulgación científica. Finalmente, agradecemos a los entusiastas estudiantes de la licenciatura en Medicina General y Comunitaria del CUS-BUAP de Teziutlán.

Referencias

- Ajibade, A. M. and Ifeanyin, O. A. (2017). Ecological and public health implications of the discharge of multidrug-resistant bacteria and physicochemical contaminants from treated wastewater effluents in the Eastern Cape, South Africa. *Rev. Water.* 9(8):562-580.
- Chahal, C.; Van den, A. B.; Young, X. F.; Franco, C.; Blackbeard, J. and Mon, P. (2016). Pathogen and particle associations in wastewater: significance and implications for treatment and disinfection processes. *Adv. Appl. Microbiol.* 97(1):64-110.
- Estigarribia Sanabria, G., Kennedy Cuevas, C., González Vera, A., & Cabriza, C. (2023). Calidad microbiológica del agua procedente de tanques y pozos artesianos de establecimientos sanitarios. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 60.
- Fábrega, J. J. H., Núñez, K., & González, A. (2022). Contaminación por coliformes y evaluación físicoquímica del agua en las cercanías de la desembocadura del río Mariato, Veraguas, Panamá. *Revista Colegiada de Ciencia*, 3(2), 90-101.
- Janda, J. M., & Abbott, S. L. (2021). The Changing Face of the Family Enterobacteriaceae (Order: "Enterobacterales"): New Members, Taxonomic Issues, Geographic Expansion, and New Diseases and Disease Syndromes. *Clinical microbiology reviews*, 34(2).
- Jara-Vilca, R. (2023). Una revisión bibliográfica sobre métodos de detección de coliformes en fuentes de agua: Avances recientes a nivel internacional. *Revista Científica Dékamu Agropec*, 4(1), 100-113.
- Lorinsky, M., & Ryan, J. (Eds.). (2024). *Bacterias gramnegativas. En El compañero en la práctica hospitalaria.* McGraw Hill Education.
- Mahlknecht, J.; Gonzalez, B. R. and Loge, F. J. (2020). Water-energy-food security: a nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean. *Energy*. 194(3):1- 17.
- Mancilla-Villa, O. R., Gómez-Villaseñor, L., Olguín-Lopez, J. L., Guevara-Gutiérrez, R. D., Hernández-Vargas, O., Ortega-Escobar, H. M., ... & Palomera-García, C. (2022). Contaminación orgánica por coliformes, Nitrógeno y Fósforo en los ecosistemas acuáticos de la cuenca Ayuquila-Armería, Jalisco, México. *Biotechnia*, 24(1), 5-14.
- Mendoza-Retana, S. S., Cervantes-Vázquez, M. G., Valenzuela-García, A. A., Guzmán-Silos, T. L., Orona-Castillo, I., & Cervantes-Vázquez, T. J. Á. (2021). Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(1), 115-126.
- Murray, P. R., Rosenthal PhD, K., & Pfaller, M. A. (2021). *Microbiología médica.* España: Elsevier Health Sciences.

- Riedel, S., Hobden, J. A., Miller, S., Morse, S. A., Mietzner, T. A., Detrick, B., Mitchell, T. G., Sakanari, J. A., Hotez, P., & Mejia, R. (Eds.). (2020). *Bacilos gramnegativos entéricos (enterobacterias)*. En Jawetz, Melnick & Adelberg *Microbiología Médica* (28a ed.). McGraw-Hill Education.
- Ryan, K. J. (Ed.). (2022). *Enterobacteriaceae*. En Sherris & Ryan. *Microbiología Médica* (8a ed.). McGraw-Hill Education.
- Venegas, B., Tello-Hernández, M. A., Cepeda-Cornejo, V., & Molina-Romero, D. (2023). Calidad microbiológica: detección de *Aeromonas* sp y *Pseudomonas* sp en garrafones provenientes de pequeñas plantas purificadoras de agua. *CienciaUAT*, 17(2), 146-164.
- Yáñez, A., Cedillo, L., Neyrolles, O., Alonso, E., Prévost, M. C., Rojas, J., ... & Cassell, G. H. (1999). *Mycoplasma penetrans* bacteremia and primary antiphospholipid syndrome. *Emerging Infectious Diseases*, 5(1), 164.

EJE INTESTINO-PULMÓN COMO FACTOR DE COMPILACIÓN EN EL COVID-19

ROLE OF GUT-LUNG AXIS AS A COMPLICATION FACTOR IN COVID-19

Marian Ortiz-Hernández
Guadalupe Soto-Rodríguez

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 32, 2025, pp. 83 - 96

RD-ICUAP

Laboratorio de Nutrición Clínica, Facultad de Medicina, Autónoma de Puebla.

(Autor de correspondencia: Guadalupe Soto-Rodríguez* Cel: 2225845554)

(marianortiz.hdez@gmail.com)

guadalupe.sotorod@correo.buap.mx)

<https://orcid.org/0009-0008-7518-3573>
<https://orcid.org/0000-0003-3195-8177>

A finales del año 2019 surgió en Wuhan, China, un virus que marca un precedente histórico y la necesidad de estudiarlo en diversas áreas de la salud. El virus SARS-CoV-2 es responsable de la enfermedad conocida como COVID-19, la cual incluye manifestaciones clínicas como dolor de cabeza, fiebre, tos, cansancio, dolor de garganta, anosmia, ageusia, e incluso náuseas, vómito y diarreas, hasta cuadros más complejos como el desarrollo del síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA), e incluso la muerte. (Seyed Hosseini et al., 2020) (Kang & Xu, 2020)

Un estado nutricional óptimo y una microbiota intestinal en eubiosis tiene importantes repercusiones sobre el sistema inmunológico, ya que ayuda a modular la respuesta inmune y a prevenir cuadros patológicos importantes, por lo que, estudiar la relación entre el eje intestino-pulmón, microbiota intestinal y la nutrición resulta de amplio interés para comprobar la influencia y repercusiones que pueden estar debilitando la respuesta inmunológica. (Dumas et al., 2018). Por lo anterior es relevante ofrecer información basada en evidencia científica que describa la conexión del eje intestino-pulmón con el desarrollo de la enfermedad de COVID-19, además la importancia de la nutrición en la modulación y respuesta inmunológica frente a la infección.

Palabras clave: Eje intestino-pulmón, COVID-19, microbiota intestinal, nutrición.

Abstract

Introduction: At the end of 2019, a virus emerged in Wuhan, China, marking a historical precedent and the need to study it in various areas of health. The SARS-CoV-2 virus is responsible for the disease known as COVID-19, which includes clinical manifestations such as headache, fever, cough, fatigue, sore throat, anosmia, ageusia, and even nausea, vomiting, and diarrhea, as well as more complex cases like the development of acute respiratory distress syndrome (ARDS) and even death.

An optimal nutritional status and a balanced intestinal microbiota have significant implications for the immune system, as they help modulate the immune response and prevent important pathological conditions. Therefore, studying the relationship between the gut-lung axis, intestinal microbiota, and nutrition is of great interest to understand the influence and consequences that may be weakening the immune response. Therefore is relevant to provide evidence-based information describing the connection between the gut-lung axis and the development of COVID-19, as well as the importance of nutrition in modulating and responding to the immune system in the face of infection.

Keywords: Gut-lung axis, COVID-19, intestinal microbiota, nutrition.

Los pulmones que se consideraban previamente como un lugar estéril, tienen una microbiota específica, distinta de la intestinal. Aunque ambas son similares a nivel de phylum, Bacteroidetes y Firmicutes predominan en el intestino, mientras que Bacteroidetes, Firmicutes, y Proteobacteria lo hacen en el pulmón. (Dumas et al., 2018) (Zhang et al., 2020)

La principal vía de entrada del virus SARS-CoV-2 es a través del tracto respiratorio, su mecanismo de transmisión es a través de gotas grandes que contienen una carga viral lo suficientemente alta. (Delgado-Gonzalez et al., 2021). Sin embargo, el virus SARS-CoV-2 no solo se multiplica en los pulmones sino también en el tracto gastrointestinal (TGI) y los síntomas gastrointestinales (SGI) se encuentran entre los más frecuentes en los pacientes infectados con SARS-CoV-2. Donde un 59.1% de los afectados presenta diarrea, náuseas (34.1%) y vómito (15.9%). (Agarwal et al., 2020) (Sociedad Iberoamericana de Microbiota, 2024).

En el TGI la barrera epitelial protege contra microorganismos patógenos, mantiene la tolerancia a los antígenos alimentarios, y está involucrada en funciones inmunes, sistémicas y pulmonares. Así, cuando existe un daño, los patógenos se trasladan a través del torrente sanguíneo a órganos distantes como los pulmones, ocasionando alteraciones como septicemia o síndrome de dificultad respiratoria aguda. (de Oliveira et al., 2021)

La mayoría de los pacientes infectados con el virus SARS-CoV-2 no presentan síntomas graves, sin embargo, existen factores de riesgo, como el estado nutricional, que pueden ocasionar que una infección leve, progrese a un estado grave o potencialmente mortal. (Skrajnowska et al., 2021). El confinamiento generó un aumento en la ingesta calórica y sedentarismo, lo que representa un aumento en la grasa corporal, visceral y, por tanto, en la

producción de citocinas proinflamatorias, que pueden incrementar la gravedad de la enfermedad (Álvarez et al., 2020)

Un sistema inmunológico fuerte es la clave para reducir la gravedad de la infección por SARS-CoV-2, a través de una dieta equilibrada que asegure una ingesta óptima de energía, macronutrientes y micronutrientes, lo que tiene repercusiones positivas en el mantenimiento del sistema inmunológico debido a sus beneficios antioxidantes y antiinflamatorios. (Skrajnowska et al., 2021)

Por otro lado, los probióticos y prebióticos también regulan la respuesta inmunológica e inflamatoria, generando efectos antiinflamatorios y antivirales en la mucosa intestinal y en órganos distantes ante alergias e infecciones respiratorias. (Kiouisi et al., 2019) (Akour, 2020)

Por ello, la finalidad de este artículo es ofrecer información actualizada acerca de la relación entre el eje intestino-pulmón como un factor de complicación en el desarrollo de COVID-19, mostrando las pautas nutricionales que han demostrado beneficios en la salud intestinal y pulmonar.

Eje intestino-pulmón y COVID-19.

Los pulmones poseen una microbiota diferente a la intestinal, (Zhang et al., 2020) sin embargo, están influenciados por señales de ésta última, (Wypych et al., 2019) por ejemplo, el consumo de antibióticos (Dumas et al., 2018) afecta de manera negativa la respuesta a infecciones tanto sistémicas como respiratorias, (Sencio et al., 2021) al alterar la microbiota intestinal y debilitar la respuesta inmunológica, tanto innata como la adaptativa. (Abt et al., 2012)

Asimismo, una infección viral generará cambios transitorios en la microbiota intestinal, que pueden observarse hasta

14 días después de la infección, (Kang & Xu, 2020) aun cuando el virus no se encuentre localmente en el intestino, por ejemplo, durante la infección por SARS-CoV-2 se ha comprobado la reducción de familias productoras de butirato, (Sencio et al., 2021) como Ruminococcaceae y Lachnospiraceae, con una mayor abundancia de bacterias oportunistas. (Johnson et al., 2021)

La microbiota intestinal impacta en la producción de interferón tipo 1 (IFN-1) una potente citocina, a nivel pulmonar, influyendo así sobre las infecciones virales pulmonares, incluido el síndrome respiratorio agudo severo, presente en la enfermedad de COVID-19. (Busnadiego et al., 2020)

El IFN-1 es el principal inductor de la activación en la respuesta inmune respiratoria, que limita la replicación viral del SARS-CoV-2. Se produce principalmente, a través de una bacteria presente en la microbiota intestinal humana: *Clostridium orbiscindens*, la cual aumenta la señalización del IFN-1 mediante el metabolito desaminotirosina (DAT), resultante de la digestión de flavonoides provenientes de plantas, y que es capaz de difundirse hacia torrente sanguíneo, llegando hasta los pulmones, estimulando al receptor IFN- α/β para preparar al sistema inmune innato. (Sencio et al., 2021) (Steed et al., 2017)

Por lo tanto, los metabolitos liberados por una microbiota intestinal sana (eubiosis) preparan y protegen a los pulmones contra las infecciones respiratorias virales, mientras que factores como el envejecimiento y las comorbilidades están asociados con la alteración de la función de la microbiota intestinal (disbiosis) y una mayor predisposición y riesgo a contraer infecciones respiratorias. (Figura 1)

Relación fisiopatológica de SARS-CoV-2 con la microbiota intestinal



Figura 1. Bidireccionalidad del eje intestino-pulmón, el estado de eubiosis o disbiosis que tiene el paciente genera alteraciones en la microbiota de manera bidireccional e influye en la respuesta inmunológica, haciendo más o menos susceptible el desarrollo de enfermedades. (Esta figura se realizó con Servier Medical Art Templates, bajo licencia de Creative Commons Attribution 3.0 Unported License; <http://smart.servier.com>)

Aunque no se conocen con exactitud los mecanismos fisiopatológicos que relacionan al proceso infeccioso COVID-19 con la microbiota intestinal, se han establecido los siguientes puntos: (Viana et al., 2020) (Villena & Kitazawa, 2020)

- 1) Todos los tejidos mucosos están interconectados, así que la activación de las células inmunes en una mucosa, influyen y alcanzan sitios distantes. (Figura 2)
- 2) Las citocinas y los factores de crecimiento secretados en el TGI en respuesta a la microbiota, pueden llegar a la circulación y actuar sobre otras mucosas.
- 3) Los patrones moleculares asociados a microbios (MAMPs) pueden ser absorbidos y conducidos a tejidos extraintestinales donde activan a la respuesta innata.
- 4) Los metabolitos de la microbiota absorbidos en la mucosa intestinal se relacionan con la modulación de la inmunidad mucosa, efecto conocido como "reprogramación metabólica", destacan los ácidos grasos de cadena corta que aumentan la respuesta antiviral pulmonar.

Existe una gran similitud (cerca del 80%)

entre el SARS y el SARS-CoV-2, mostrando tropismo por el tracto gastrointestinal, al detectar muestras del virus SARS-CoV-2 en muestras de materia fecal de pacientes infectados y con diarrea, aun después de la infección. (Delgado-Gonzalez et al., 2021)



Figura 2. Todos los tejidos mucosos están interconectados, por lo que una disbiosis en la microbiota intestinal puede afectar la respuesta inmunológica en tejidos mucosos distantes y favorecer la infección por SARS-CoV2 (Esta figura se realizó con Servier Medical Art Templates, bajo licencia de Creative Commons Attribution 3.0

Unported License; <http://smart.servier.com>)

Importancia de los ácidos grasos de cadena corta (AGCC).

La microbiota intestinal con una dieta alta en fibra y mediante la producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC) es capaz de aumentar la hematopoyesis en médula ósea, genera un incremento de macrófagos y la función efectora de los linfocitos T CD8+, disminuyendo así el tiempo de infección. (Trompette et al., 2018). Por lo que una dieta alta en fibra disminuye el riesgo de enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Zhang et al., 2020) y mejora la función pulmonar, debido a una mejora en la presencia y actividad de las bacterias beneficiosas y de la integridad epitelial.

Por tanto, los AGCC producidos por la mi-

crobiota intestinal influyen el estado inflamatorio del paciente, y la respuesta inmune tanto innata como adaptativa, empleando el sistema mesentérico linfático para la translocación de bacterias ya sean intactas o sus metabolitos a través de la barrera intestinal. (Uzzan et al., 2020) En especial, el butirato, mediante la vía mTOR-S6K, disminuye la diferenciación de las células T y la expresión de citocinas, al tiempo que aumenta la expresión de Foxp3, estimulando así la diferenciación hacia células Treg. (Johnson et al., 2021)

COVID-19 y Microbiota intestinal

Tanto en los pulmones como en el intestino se expresan los receptores ACE2 (enzima convertidora de angiotensina 2), y a los receptores TMPRSS2, necesarios para la infección por SARS-CoV-2, que en el intestino puede representar una complicación de COVID-19 a través de 3 pasos; (Delgado-Gonzalez et al., 2021)

1. La expresión de citocinas proinflamatorias (que a su vez pueden estar influenciadas y estimuladas por enfermedades y comorbilidades como la obesidad, diabetes, hipertensión, asma, enfermedades cardiovasculares y otros factores como la edad generando disbiosis intestinal).
2. Disminuye la expresión del receptor ACE2 lo que altera a su vez la respuesta inmune.
3. Se ejerce un efecto citopático directo debido a cambios estructurales de la célula generados por la infección, alterando la integridad intestinal. (Figura 3)

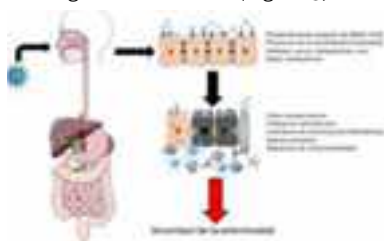


Figura 3. La presencia de comorbilidades contribuye a la severidad de la enfermedad COVID-19, porque aumenta la expresión de citocinas proinflamatorias y el daño a la barrera epitelial a través de diferentes mecanismos. (Esta figura se realizó con Servier Medical Art templates, bajo licencia de Creative Commons Attribution 3.0 Unported License; <https://smart.servier.com>)

El SARS-CoV-2 puede infectar el tracto gastrointestinal, donde existe una alta tasa de replicación de virus, principalmente en las células epiteliales del intestino, ya que se ha encontrado la presencia del virus en el TGI, desde el esófago, estómago, duodeno y recto, además en muestras fecales de pacientes con COVID-19. (de Oliveira et al., 2021) Aunque no existe una relación de los SGI con la mortalidad, si lo hubo en la admisión a cuidados Intensivos (UCI). (Britton et al., 2021) (Pan et al., 2020)

Por otro lado, la disbiosis intestinal presente en diabetes tipo 2 (DT2), (Jafar et al., 2016) obesidad, hipertensión, enfermedad coronaria, participa en la alteración de la respuesta inmune en respuesta al SARS-CoV-2, lo que favorece la diseminación y gravedad de la enfermedad. (Villena & Kitazawa, 2020) Así, la disbiosis y el daño epitelial induce la expresión de ACE2, aumentando la replicación viral en el TGI y su diseminación, lo que explicaría por qué los pacientes con mayores SGI tienen una peor prognosis. (Pan et al., 2020) (Viana et al., 2020)

Por otro lado, la infección por SARS-CoV2 aumenta la permeabilidad de las uniones estrechas y permite el paso de bacterias hacia torrente sanguíneo, lo que activa al sistema inmune y se liberan mediadores inflamatorios, alterando la función intestinal y metabólica, esto puede contribuir a la severidad de COVID-19 (Giron et al., 2021) (Figura 4)

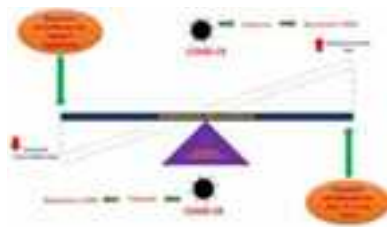


Figura 4. Alteraciones en la respuesta inmunológica generadas por la microbiota intestinal y la respuesta inmune ante la infección por SARS-CoV-2 (COVID-19). (Esta figura se realizó con Servier Medical Art templates, bajo licencia de Creative Commons Attribution 3.0 Unported License; <https://smart.servier.com>)

La microbiota intestinal de pacientes graves, incluso con pruebas PCR negativas para SARS-CoV-2, tienen niveles más elevados de *Ruminococcus gnavus*, (Johnson et al., 2021) *Ruminococcus torques* y *Bacteroides dorei* y una disminución dramática de *F. prausnitzii*, *bifidobacteria* y *Eubacterium rectale*. Destaca la reducción de *F. prausnitzii* que constituye aproximadamente el 5-15% del microbioma intestinal sano y que se sabe es un importante productor de butirato. (Konturek, 2021)

Asimismo, se ha propuesto que dentro de la patogénesis de la enfermedad de COVID-19 el triptófano puede verse comprometido debido a que el virus SARS-CoV-2 puede interferir con su absorción. El triptófano estimula la vía mTOR para la producción de péptidos antimicrobianos, los cuales ayudan a mantener la homeostasis intestinal. (Delgado-Gonzalez et al., 2021) (Sociedad Iberoamericana de Microbiota, 2024)

Así el TGI de los pacientes infectados con SARS CoV-2 'puede actuar como un nicho fértil para una replicación viral persistente. Ya que es capaz de infectar a los enterocitos maduros ACE2+ en el intestino delgado, lo que conduce a la disrupción de la barrera intestino-sanguínea generando una dispersión de bacterias, endotoxinas, y metabolitos microbianos que comprometen la respuesta inmune del hospedero y potencian una alteración fisiológica severa, llevando finalmente a un choque séptico. (Villena & Kitazawa, 2020) (Viana

Los cambios en la composición y función de la microbiota generan cambios en el tracto respiratorio a través del sistema inmune de mucosas, del mismo modo las alteraciones en la microbiota respiratoria afectan el tracto digestivo a través de la regulación inmune. (Qing Ye, et al., 2020) (Figura 5)

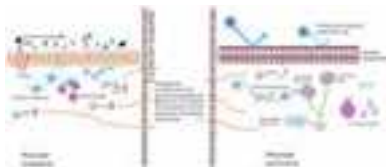


Figura 5. Modulación sistémica de la respuesta inmune innata y adaptativa inducida por la microbiota intestinal con la producción de metabolitos y componentes saludables de un intestino equilibrado afecta a los pulmones, regula el proceso inflamatorio y protege contra una infección severa por SARS CoV-2. (Esta figura se realizó con Servier Medical Art templates, bajo licencia de Creative Commons Attribution 3.0

Unported License; <https://smart.servier.com>)

Terapia nutricional

La mayoría de los pacientes infectados con el virus SARS-CoV-2 no presentan síntomas graves, sin embargo, existen factores de riesgo que pueden ocasionar que una infección leve progrese a un estado grave o potencialmente mortal, los cuales están relacionados con su estado nutricional. (Álvarez et al., 2020) Por ejemplo, la presencia de obesidad, que, aunque no es un factor único ni determinante, puede ser responsable del desarrollo de enfermedades concomitantes como diabetes, hipertensión, aumento de la presión en la cavidad pleural, generando atelectasia o colapso alveolar. (Skrajnowska et al., 2021)

Por otro lado, pacientes en estado de desnutrición puede tener repercusiones importantes debido a deficiencias energéticas y proteicas, lo que compromete a su sistema inmunológico y, por lo tanto, pueden aumentar el riesgo de enfermedad después de la infección por SARS-CoV-2.

(Álvarez et al., 2020) (Figura 6)



Figura 6. Factores de riesgo y complicaciones relacionadas a un estado nutricional deteriorado en el curso de la enfermedad de COVID-19. (Esta figura se realizó con Servier Medical Art templates, bajo licencia de Creative Commons Attribution 3.0 Unported License; <https://smart.servier.com>)

El Panel científico competente de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y otras sociedades internacionales de salud pública señalan un grupo de micronutrientes importantes para el mantenimiento del sistema inmunológico, para disminuir el riesgo de COVID-19, entre las que se encuentran: (Galmés et al., 2020) (Calder et al., 2020) (Iddir et al., 2020)

Vitamina D: Se ha demostrado que la 25-hidroxitamina-D es más baja en los casos más graves de COVID-19, sobre todo, en países con baja exposición al sol. (Galmés et al., 2020)

Vitamina C: Promueve la producción de anticuerpos, y la diferenciación de células T, además de proteger contra el daño oxidativo. (Calder, 2021)

Vitamina A: Posee acciones inmunomoduladoras al aumentar la efectividad de los interferones tipo 1 IFN-I. (Galmés et al., 2020)

Vitamina E: Tiene un papel importante en la inmunidad innata y adquirida, al eliminar especies reactivas de oxígeno, protegiendo a las células de procesos oxidativos. (Álvarez et al., 2020) (Calder, 2021)

Complejo B: Una correcta suplementación de B9, B6 y B12 durante COVID-19 disminuye la muerte de las células infectadas mediada por el aumento de homocisteína. (Galmés et al., 2020)

Zinc: La mortalidad es dos veces más alta en personas con niveles bajos de Zn, especialmente en adultos de edad avanzada con neumonía. (Iddir et al., 2020)

Hierro: En pacientes graves con COVID-19 puede presentarse hiperferritinemia, por lo una ingesta adecuada de este mineral en los pacientes contribuye a mejorar el pronóstico del paciente. (Galmés et al., 2020)

Cobre: Un nivel adecuado estimula la actividad de las células NK, macrófagos, neutrófilos y monocitos. (Calder, 2021)

Selenio: Genera una buena producción de IL-2, la cual posee funciones inmunomoduladoras. (Sies & Parnham, 2020)

Omega-3: Los ácidos grasos poliinsaturados tienen un papel importante en la regulación de la respuesta inflamatoria. (Skrajnowska et al., 2021) (Pecora et al., 2020). Por otro lado, algunos componentes nutricionales como los fitoquímicos (polifenoles y carotenoides) poseen efectos inmunomoduladores, ya que se ha estudiado su influencia en la disminución de la replicación viral. (Iddir et al., 2020)

Probióticos y prebióticos:

Los probióticos definidos por la Organización Mundial de la Salud como "microorganismos vivos que, cuando se administran en cantidades adecuadas, confieren un beneficio para la salud", (Akour, 2020) participan en la modulación de la microbiota intestinal, regulan el sistema inmunológico y reducen la gravedad de algunas patologías.

Por su parte, los prebióticos también han mostrado muchos beneficios para la salud, son "sustratos que son utilizados selectivamente por los microorganismos del huésped y confieren un beneficio para la salud", (Neri-Numa et al., 2020) participan como inhibidores de patógenos y, además, ayudan a modular funciones inmunitarias. (Akour, 2020)

Los probióticos pueden generar efectos antiinflamatorios y antivirales en la mucosa intestinal y en órganos distantes ante alergias e infecciones respiratorias. (Kiouisi et al., 2019) (Akour, 2020) Por lo que la hipótesis de que los probióticos dentro del tratamiento pueden contribuir como parte de la prevención y en el curso de la enfermedad, frenando la replicación viral gracias a su efecto antiinflamatorio representa una herramienta muy útil en la terapéutica nutricional para la población infectada por SARS-CoV-2. (Pham et al., 2021)

Por ejemplo, un estudio en ratones señala el impacto de la administración del probiótico *Lactobacillus rhamnosus* CRL1505 durante infecciones respiratorias virales, sobre la inmunomodulación distal y la respuesta inmune en el pulmón al aumentar los niveles de IFN I en el tracto respiratorio. (Villena & Kitazawa, 2020)

Por otro lado, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum* generan una disminución de citocinas proinflamatorias como IL-6 e IL-8. Las cepas *L. rhamnosus* GG GR-1 y 4B15 inhiben al factor de necrosis tumoral alfa (TNF- α) en macrófagos de ratón. Asimismo, *Lactobacillus mucosae* o *fermentum* disminuyen a IL-6 y el TNF- α tanto en la inflamación aguda como en la crónica en ratones suplementados con estos probióticos. (Pham et al., 2021) (Ayyanna et al., 2018) .

duras, legumbres y granos enteros. Esta falta de fibra puede llevar a problemas digestivos, como el estreñimiento, y en algunos casos puede provocar irritación en el sistema digestivo (Masood W. et al., 2023) Además, algunas personas experimentan un desequilibrio en la microbiota intestinal debido a la falta de diversidad en su dieta, lo que puede afectar su salud digestiva a largo plazo (Paoli, A. et al., 2019).

CONCLUSIONES

El estado nutricional y las comorbilidades del paciente, afectan la respuesta inmunológica del individuo y por ende la gravedad de la infección por el SARS-CoV-2, estos pacientes requieren apoyo nutricional ya sea ambulatorio u hospitalario. Siempre el objetivo de la intervención nutricional es mantener y asegurar una ingesta correcta de energía, macronutrientes y micronutrientes, cubriendo los requerimientos diarios (RDA) asegurando así los beneficios antioxidantes y antiinflamatorios, buscando priorizar siempre la vía oral, fortificando o alimentando por vía enteral o parental optimizando el tiempo de recuperación del paciente.

(Skrajnowska et al., 2021) (Stachowska et al., 2020) (Álvarez et al., 2020)

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los finales declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionado a terceros..

Agradecimientos

Las autoras agradecen a D.C. Enrique Torres Rasgado y D.C. Bertha Alicia León Chávez por su valiosa contribución a este trabajo.

Referencias

- Abt, M. C., Osborne, L. C., Monticelli, L. A., Doering, T. A., Alenghat, T., Sonnenberg, G. F., Paley, M. A., Antenus, M., Williams, K. L., Erikson, J., Wherry, E. J., & Artis, D. (2012). Commensal Bacteria Calibrate the Activation Threshold of Innate Antiviral Immunity. *Immunity*, 37(1), 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2012.04.011>
- Agarwal, A., Chen, A., Ravindran, N., To, C., & Thuluvath, P. J. (2020). Gastrointestinal and Liver Manifestations of COVID-19. *Journal of Clinical and Experimental Hepatology*, 10(3), 263–265. <https://doi.org/10.1016/j.jceh.2020.03.001>
- Akour, A. (2020). Probiotics and COVID-19: is there any link? *Letters in Applied Microbiology*, 71(3), 229–234. <https://doi.org/10.1111/lam.13334>
- Álvarez, J., Lallena, S., & Bernal, M. (2020). Nutrition and the COVID-19 pandemic. *Medicine (Spain)*, 13(23), 1311–1321. <https://doi.org/10.1016/j.med.2020.12.013>
- Ayyanna, R., Ankaiah, D., & Arul, V. (2018). Anti-inflammatory and Antioxidant Properties of Probiotic Bacterium *Lactobacillus mucosae* AN1 and *Lactobacillus fermentum* SNR1 in Wistar Albino Rats. *Frontiers in Microbiology*, 9(December), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03063>
- Britton, G. J., Chen-Liaw, A., Cossarini, F., Livanos, A. E., Spindler, M. P., Plitt, T., Eggers, J., Mogno, I., Gonzalez-Reiche, A. S., Siu, S., Tankelevich, M., Grinspan, L. T., Dixon, R. E., Jha, D., van de Guchte, A., Khan, Z., Martinez-Delgado, G., Amanat, F., Hoagland, D. A., ... Faith, J. J. (2021). Limited intestinal inflammation despite diarrhea, fecal viral RNA and SARS-CoV-2-specific IgA in patients with acute COVID-19. *Scientific Reports*, 11(1), 13308. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92740-9>
- Busnadiego, I., Fernbach, S., Pohl, M. O., Karakus, U., Huber, M., Trkola, A., Stertz, S., & Hale, B. G. (2020). Antiviral activity of type i, ii, and iii interferons counterbalances ace2 inducibility and restricts sars-cov-2. *MBio*, 11(5), 1–10. <https://doi.org/10.1128/mBio.01928-20>
- Calder, P. C. (2021). Nutrition and immunity: lessons for COVID-19. *Nutrition and Diabetes*, 11(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41387-021-00165-0>
- Calder, P. C., Carr, A. C., Gombart, A. F., & Eggersdorfer, M. (2020). Optimal nutritional status for a well-functioning immune system is an important factor to protect against viral infections. *nutrients* 2020, 12, 1181". *Nutrients*, 12(8), 1–3. <https://doi.org/10.3390/nu12082326>

de Oliveira, G. L. V., Oliveira, C. N. S., Pinzan, C. F., de Salis, L. V. V., & Cardoso, C. R. de B. (2021). Microbiota Modulation of the Gut-Lung Axis in COVID-19. *Frontiers in Immunology*, 12(February). <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.635471>

Delgado-Gonzalez, P., Gonzalez-Villarreal, C. A., Roacho-Perez, J. A., Quiroz-Reyes, A. G., Islas, J. F., Delgado-Gallegos, J. L., Arellanos-Soto, D., Galan-Huerta, K. A., & Garza-Treviño, E. N. (2021). Inflammatory effect on the gastrointestinal system associated with COVID-19. *World Journal of Gastroenterology*, 27(26), 4160–4171. <https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i26.4160>

Dumas, A., Bernard, L., Poquet, Y., Lugo-Villarino, G., & Neyrolles, O. (2018). The role of the lung microbiota and the gut-lung axis in respiratory infectious diseases. *Cellular Microbiology*, 20(12), 1–9. <https://doi.org/10.1111/cmi.12966>

Galmés, S., Serra, F., & Palou, A. (2020). Current state of evidence: Influence of nutritional and nutrigenetic factors on immunity in the COVID-19 pandemic framework. *Nutrients*, 12(9), 1–33. <https://doi.org/10.3390/nu12092738>

Ghoshal, U. C., Ghoshal, U., & Dhiman, R. K. (2020). Gastrointestinal and Hepatic Involvement in Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Infection: A Review. *Journal of Clinical and Experimental Hepatology*, 10(6), 622–628. <https://doi.org/10.1016/j.jceh.2020.06.002>

Giron, L. B., Dweep, H., Yin, X., Wang, H., Damra, M., Goldman, A. R., Gorman, N., Palmer, C. S., Tang, H. Y., Shaikh, M. W., Forsyth, C. B., Balk, R. A., Zilberstein, N. F., Liu, Q., Kossenkova, A., Keshavarzian, A., Landay, A., & Abdel-Mohsen, M. (2021). Plasma Markers of Disrupted Gut Permeability in Severe COVID-19 Patients. *Frontiers in Immunology*, 12(June), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.686240>

Iddir, M., Brito, A., Dingemans, G., Del Campo, S. S. F., Samouda, H., La Frano, M. R., & Bohn, T. (2020). Strengthening the immune system and reducing inflammation and oxidative stress through diet and nutrition: Considerations during the covid-19 crisis. *Nutrients*, 12(6), 1–43. <https://doi.org/10.3390/nu12061562>

Jafar, N., Edriss, H., & Nugent, K. (2016). The effect of short-term hyperglycemia on the innate immune system. *American Journal of the Medical Sciences*, 351(2), 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.amjms.2015.11.011>

Johnson, S. D., Olwenyi, O. A., Bhyravbhatla, N., Thurman, M., Pandey, K., Klug, E. A., Johnston, M., Dyavar, S. R., Acharya, A., Podany, A. T., Fletcher, C. V., Mohan, M., Singh, K., & Byreddy, S. N. (2021). Therapeutic implications of SARS-CoV-2 dysregulation of the gut-brain-lung axis. *World Journal of Gastroenterology*, 27(29), 4763–4783. <https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i29.4763>

Kang, Y., & Xu, S. (2020). Comprehensive overview of COVID-19 based on current evidence. *Dermatologic Therapy*, 33(5), 1–8. <https://doi.org/10.1111/dth.13525>

Kioui, D. E., Karapetsas, A., Karolidou, K., Panayiotidis, M. I., Pappa, A., & Galanis, A. (2019). Probiotics in extraintestinal diseases: Current trends and new directions. *Nutrients*, 11(4), 1–26. <https://doi.org/10.3390/nu11040788>

Konturek, P. C. (2021). Wie wirkt sich COVID-19 auf die intestinale Mikrobiota aus? *MMW - Fortschritte Der Medizin*, 163(S5), 17–20. <https://doi.org/10.1007/s15006-021-0200-5>

Neri-Numa, I. A., Arruda, H. S., Geraldi, M. V., Maróstica Júnior, M. R., & Pastore, G. M. (2020). Natural prebiotic carbohydrates, carotenoids and flavonoids as ingredients in food systems. *Current Opinion in Food Science*, 33, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.004>

Pan, L., Mu, M., Yang, P., Sun, Y., Wang, R., Yan, J., Li, P., Hu, B., Wang, J., Hu, C., Jin, Y., Niu, X., Ping, R., Du, Y., Li, T., Xu, G., Hu, Q., & Tu, L. (2020). Clinical characteristics of COVID-19 patients with digestive symptoms in Hubei, China: A descriptive, cross-sectional, multicenter study. *American Journal of Gastroenterology*, 115(5), 766–773. <https://doi.org/10.14309/ajg.0000000000000620>

Pecora, F., Persico, F., Argentiero, A., Neglia, C., & Esposito, S. (2020). The role of micronutrients in support of the immune response against viral infections. *Nutrients*, 12(10), 1–45. <https://doi.org/10.3390/nu12103198>

Pham, M. T., Yang, A. J., Kao, M. S., Gankhuyag, U., Zayabaatar, E., Jin, S. L. C., & Huang, C. M. (2021). Gut probiotic *Lactobacillus rhamnosus* attenuates PDE4B-mediated interleukin-6 induced by SARS-CoV-2 membrane glycoprotein. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 98, 108821. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2021.108821>

Qing Ye, MD, Bili Wang, Ting Zhang, Jian Xu, Shiqiang Shang, M. (2020). The mechanism and treatment of gastrointestinal symptoms in patients with COVID-19. *REVIEW Inflammation, Immunity, Fibrosis, and Infection*.

Sencio, V., Machado, M. G., & Trottein, F. (2021). The lung–gut axis during viral respiratory infections: the impact of gut dysbiosis on secondary disease outcomes. *Mucosal Immunology*, 14(2), 296–304. <https://doi.org/10.1038/s41385-020-00361-8>

Seyed Hosseini, E., Riahi Kashani, N., Nikzad, H., Azadbakht, J., Hassani Bafrani, H., & Haddad Kashani, H. (2020). The novel coronavirus Disease-2019 (COVID-19): Mechanism of action, detection and recent therapeutic strategies. *Virology*, 551(August), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2020.08.011>

Sies, H., & Parnham, M. J. (2020). Potential therapeutic use of ebelsens for COVID-19 and other respiratory viral infections. *Free Radical Biology and Medicine*, 156(June), 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2020.06.032>

Singer, P., Blaser, A. R., Berger, M. M., Alhazzani, W., Calder, P. C., Casaer, M. P., Hiesmayr, M., Mayer, K., Montejó, J. C., Pichard, C., Preiser, J. C., van Zanten, A. R. H., Oczkowski, S., Szczeklik, W., & Bischoff, S. C. (2019). ESPEN guideline on clinical nutrition in the intensive care unit. *Clinical Nutrition*, 38(1), 48–79. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2018.08.037>

Skrajnowska, D., Brumer, M., Kankowska, S., Matysek, M., Miazio, N., & Bobrowska-Korczak, B. (2021). Covid 19: Diet composition and health. *Nutrients*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/nu13092980>

Sociedad Iberoamericana de Microbiota, P. y P. (2024). *Anales de Microbiota, Probióticos y Prebióticos*. 35–39. <https://semipyp.es/wp-content/uploads/2024/02/AMPP-5-1.pdf>

Stachowska, E., Folwarski, M., Jamioł-Milc, D., Maciejewska, D., & Skonieczna-Żydecka, K. (2020). Nutritional support in coronavirus 2019 disease. *Medicina (Lithuania)*, 56(6), 1–14. <https://doi.org/10.3390/medicina56060289>

Steed, A. L., Christophi, G. P., Kaiko, G. E., Sun, L., Goodwin, V. M., Jain, U., Esaulova, E., Artyomov, M. N., Morales, D. J., Holtzman, M. J., Boon, A. C. M., Lenschow, D. J., & Stappenbeck, T. S. (2017). The microbial metabolite desaminotyrosine protects from influenza through type I interferon. *Science*, 357(6350), 498–502. <https://doi.org/10.1126/science.aam5336>

Trompette, A., Gollwitzer, E. S., Pattaroni, C., Lopez-Mejia, I. C., Riva, E., Pernot, J., Ubags, N., Fajas, L., Nicod, L. P., & Marsland, B. J. (2018). Dietary Fiber Confers Protection against Flu by Shaping Ly6c⁺ Patrolling Monocyte Hematopoiesis and CD8⁺ T Cell Metabolism. *Immunity*, 48(5), 992–1005.e8. <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2018.04.022>

Uzzan, M., Corcos, O., Martin, J. C., Treton, X., & Bouhnik, Y. (2020). Why is SARS-CoV-2 infection more severe in obese men? The gut lymphatics – Lung axis hypothesis. January.

Viana, S. D., Nunes, S., & Reis, F. (2020). ACE2 imbalance as a key player for the poor outcomes in COVID-19 patients with age-related comorbidities – Role of gut microbiota dysbiosis. *Ageing Research Reviews*, 62(May), 101123. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2020.101123>

Villena, J., & Kitazawa, H. (2020). The Modulation of Mucosal Antiviral Immunity by Immunobiotics: Could They Offer Any Benefit in the SARS-CoV-2 Pandemic? *Frontiers in Physiology*, 11(June), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00699>

Wypych, T. P., Wickramasinghe, L. C., & Marsland, B. J. (2019). The influence of the microbiome on respiratory health. In *Nature Immunology* (Vol. 20, Issue 10, pp. 1279–1290). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41590-019-0451-9>

Zhang, Q., Hu, J., Feng, J. W., Hu, X. T., Wang, T., Gong, W. X., Huang, K., Guo, Y. X., Zou, Z., Lin, X., Zhou, R., Yuan, Y. Q., Zhang, A. D., Wei, H., Cao, G., Liu, C., Chen, L. L., & Jin, M. L. (2020). Influenza infection elicits an expansion of gut population of endogenous *Bifidobacterium animalis* which protects mice against infection. *Genome Biology*, 21(1). <https://doi.org/10.1186/s13059-020-02007-1>

EL COSTO ULTRAFINO DE LA URBANIZACIÓN DEL AIRE EN PUEBLA Y LA CARRERA POR UN AIRE MÁS LIMPIO

THE ULTRAFINE COST OF URBANIZATION: AIR POLLUTION IN PUEBLA
IN PUEBLA AND THE RACE FOR A CLEANER AIR

(1)Josué Guzmán-Linares, (1,2)Ivonne
Ramírez-Díaz, (3)Marco Antonio
Herrera-García, (3)Francisco Javier
Solano-Huitzil, (1)Karla Rubio

(1)Laboratorio Internacional EPIGEN, Consejo de Ciencia y
Tecnología del Estado de Puebla (CONCYTEP), Instituto de Ciencias,
Ecocampus, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP),
Puebla 72570, México; (2)Universidad Popular Autónoma del Estado
de Puebla (UPAEP), Doctorado en Biotecnología, Puebla, México; (3)
Departamento de Monitoreo y Evaluación de Emisiones, Secretaría
de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento
Territorial, Gobierno del Estado de Puebla.

Karla Rubio*
Josué Guzmán*
epigen.concytep@puebla.gob.mx
josue.guzl98@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-9928-7747>
<https://orcid.org/0000-0002-3761-6445>
<https://orcid.org/0009-0001-6088-291X>
<https://orcid.org/0009-0009-4457-7489>
<https://orcid.org/0000-0002-8337-3106>

Recibido: 9 de Noviembre 2024
Revisado: 30 junio 2025
Publicado: 30 de Agosto 2025
A11N88.25/1003

La contaminación del aire es un problema global con graves consecuencias para la salud humana. Los contaminantes como el polvo, el humo o los gases tóxicos afectan la esperanza de vida e incrementan la incidencia de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y diversos tipos de cáncer. Las ciudades, con su alta actividad industrial y tráfico vehicular, son especialmente vulnerables a estos efectos. Además, la contaminación atmosférica puede desplazarse a través de fronteras, afectando comunidades más allá de su origen, lo que convierte la protección del aire en una responsabilidad compartida. Para abordar esta problemática, se han implementado tecnologías y políticas de mitigación, como la prohibición de clorofluorocarbonos, la reducción de partículas emitidas por plantas de energía y la adopción de convertidores catalíticos en vehículos. Estos avances demuestran que mejorar la calidad del aire es posible mediante esfuerzos coordinados. Investigaciones en ciencias ómicas, como la genómica y epigenómica, ayudan a entender cómo los contaminantes afectan la salud a nivel molecular, permitiendo identificar biomarcadores de exposición y diseñar intervenciones preventivas y personalizadas. Este artículo examina la situación en la ciudad de Puebla, México, donde el crecimiento urbano y la actividad industrial elevan las emisiones de PM_{2.5} y PM₁₀, partículas vinculadas con enfermedades crónicas. Se analizan las tendencias de estas emisiones y los esfuerzos locales e internacionales de mitigación. La meta es ofrecer una visión integral sobre el impacto de la contaminación del aire en la salud y destacar la urgencia de fortalecer las estrategias de control ambiental en áreas vulnerables.

Palabras clave: Contaminación, Salud, PM_{2.5}, PM₁₀, Ciencias ómicas, Epigenética, Exposoma, Política

Abstract

Air pollution is a global problem with serious consequences for human health. Pollutants such as dust, smoke and toxic gases affect life expectancy and increase the incidence of respiratory and cardiovascular diseases, as well as various types of cancer. Cities with their high industrial activity and vehicular traffic, are particularly vulnerable to these effects. Additionally, air pollution can travel across borders, affecting communities beyond its source, making clean air protection a shared responsibility. To address this issue, mitigation technologies and policies have been implemented, such as the ban on chlorofluorocarbons, reduction of particulate emissions from power plants, and adoption of catalytic converters in vehicles. These advances demonstrate that improving air quality is possible through coordinated efforts. Research in omics sciences, like genomics and epigenomics, helps us understand how pollutants impact health at the molecular level, enabling the identification of exposure biomarkers and the design of preventive and personalized interventions. This article examines the situation in Puebla, Mexico, where urban growth and industrial activity have raised PM_{2.5} and PM₁₀ emissions, particles linked to chronic diseases. It analyzes the trends in these emissions and local and international mitigation efforts. The goal is to provide a comprehensive view of the impact of air pollution on health and emphasize the urgency of strengthening environmental control strategies in vulnerable areas.

1. Introducción

El aire es un recurso esencial, a menudo imperceptible en nuestro día a día. Solo lo notamos en forma de polvo suspendido, humo, cenizas o niebla en el ambiente. Estos elementos, junto con gases nocivos, vapores químicos y partículas biológicas, forman la contaminación del aire, un problema cuyas consecuencias para la salud y el medio ambiente han sido evidentes durante mucho tiempo. Hoy en día, los efectos adversos de la contaminación del aire se documentan cada vez más con relación a la esperanza de vida, así como al aumento en la incidencia de enfermedades, como distintos tipos de cáncer y enfermedades metabólicas cardiovasculares y pulmonares.

Las grandes ciudades, como centros de actividad humana e industrial, son especialmente vulnerables a la contaminación del aire. Esta contaminación a través de, por ejemplo, el humo generado por automóviles, actividades industriales, emisiones de volcanes, e incendios forestales, puede desplazarse a través de distintas fronteras políticas y geográficas, exponiendo a comunidades enteras a condiciones peligrosas sin importar su ubicación. Por lo tanto, proteger el aire limpio es una responsabilidad compartida a nivel local y global. Este esfuerzo implica monitorear los niveles de contaminación, comprender sus efectos en la salud humana, abordar su impacto en comunidades desfavorecidas y realizar cambios en nuestras ciudades y entornos para garantizar un aire más saludable.

Para muchas personas, la contaminación del aire es el precio de un desarrollo social y económico que, aunque deseado, suele ser desigual. La generación de energía, la agricultura intensiva, las prácticas modernas de construcción, el transporte y la industria son actividades que han traído beneficios, pero también han degradado la calidad del aire. No obstante, hay historias de éxito. Varias naciones han implementado regulaciones y han invertido en tecnologías de mitigación. Los avances incluyen

la prohibición internacional de los refrigerantes con clorofluorocarbonos, la reducción de partículas y dióxido de azufre provenientes de plantas de energía de carbón y la adopción de convertidores catalíticos que disminuyen las emisiones de óxidos de nitrógeno en vehículos. Estos logros muestran que existen herramientas y estrategias para mejorar la calidad del aire, si elegimos convertir esta tarea en una prioridad (Funk et al., 2024).

Estudios recientes en ciencias ómicas —disciplinas como la genómica, transcriptómica y epigenómica— están profundizando nuestra comprensión de los efectos de la contaminación del aire en la salud humana. Estas investigaciones permiten examinar cómo los contaminantes afectan los patrones de expresión génica, y consecuentemente provocan diversas patologías. Mediante estos estudios, los científicos pueden identificar biomarcadores específicos que revelan los impactos moleculares de la exposición a largo plazo, lo que facilita el diseño de intervenciones personalizadas y políticas de salud pública más efectivas para prevenir enfermedades inducidas por la contaminación (Meier et al., 2024).

La contaminación del aire es un problema complejo y multifacético, cuya solución requiere una combinación de políticas eficaces, tecnologías de mitigación y el compromiso colectivo. En particular, la contaminación por material particulado (PM por sus siglas en inglés) representa una de las amenazas más preocupantes para la salud pública. Estas partículas pueden medir de 10 a menos de 1 micrómetro de diámetro, por lo que son lo suficientemente pequeñas como para ingresar en las ramificaciones más pequeñas de los pulmones y, eventualmente, a otros órganos humanos. Numerosos estudios han vinculado la exposición a PM_{2.5} y PM₁₀ con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, incrementando el riesgo de problemas crónicos y reducción de la calidad de vida, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas.

Este artículo se enfoca en dos aspectos esenciales de la problemática de la contaminación del aire, aspectos que

abordamos mediante colaboraciones y proyectos disciplinarios con instituciones académicas y gubernamentales en nuestro grupo de investigación: 1) Examinar las tendencias específicas de emisiones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en estaciones de monitoreo de la ciudad de Puebla, un caso relevante dada su creciente urbanización y actividad industrial, así como el impacto directo de esta contaminación en la salud de sus habitantes; 2) recopilar y analizar los esfuerzos actuales para mitigar la contaminación del aire, con especial atención a las iniciativas globales y locales que han mostrado resultados positivos en la reducción de emisiones contaminantes. Al explorar los efectos de la exposición a $PM_{2.5}$ y PM_{10} , se pretende ofrecer una visión clara de las consecuencias en la salud pública y señalar la importancia de implementar y mejorar estrategias de mitigación en regiones vulnerables.

2. Contaminación por material particulado

2.1 Partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} y sus fuentes principales

Un ambiente limpio es esencial para el confort, la salud y el bienestar humano, así como para la estabilidad del clima. Sin embargo, tanto los países desarrollados como los países en vías de desarrollo enfrentan problemas de contaminación del aire que tienen un impacto significativo en la salud pública y en el clima. Uno de los contaminantes del aire más preocupantes es el material particulado, compuesto de pequeñas gotas líquidas o partículas sólidas suspendidas en la atmósfera (Zeb, B. et al., 2024).

El material particulado tiene diversas fuentes y puede entrar a nuestro organismo principalmente a través del sistema respiratorio (Figura 1). Las actividades humanas como la quema de combustibles, las refinerías de petróleo, el tráfico vehicular, las plantas de energía, las emisiones industriales y la quema de carbón y biomasa, contribuyen de manera fundamental. Sin embargo, también existen fuentes naturales, como el polvo

arrastrado por el viento, las emisiones volcánicas, los incendios forestales, restos de madera, polvo de suelo y la conversión de gases de origen biológico en partículas (Huang et al., 2024).

El material particulado puede liberarse directamente en la atmósfera como aerosoles primarios, o puede formarse dentro de la atmósfera a través de la conversión de gases en partículas, generando aerosoles secundarios (Huang et al., 2024). El material particulado se clasifica respecto a su tamaño: PM_{10} , con un diámetro igual o menor a 10 micras; $PM_{2.5}$, menor a 2.5 micras; y PM_1 , que incluye partículas de menos de 1 micra, también llamadas ultrafinas. La composición de estas partículas varía según su tamaño. Por ejemplo, las PM_1 contienen principalmente carbono y elementos provenientes del polvo de construcción y sustancias químicas liberadas por industrias cercanas a áreas de tráfico vehicular. En cambio, las partículas de $PM_{2.5}$ suelen incluir metales pesados, compuestos orgánicos, sulfatos, nitratos y amonio. Las PM_{10} , en su mayoría, están compuestas por partículas secundarias que se forman a partir de otras sustancias en la atmósfera (Gavito-Covarrubias et al., 2024).

El análisis de la composición química del PM es esencial para evaluar la calidad del aire en zonas urbanas e industriales y resulta clave para tomar medidas preventivas que protejan la salud pública. Sin embargo, su composición específica varía, ya que depende de factores como la región, el clima y las actividades humanas.



Figura 1: Fuentes de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Las actividades humanas, como la quema de combustibles, tráfico vehicular, emisiones industriales y la quema de carbón y biomasa, representan contribuciones signi-

ficativas de PM. A su vez, existen fuentes naturales, como el polvo arrastrado por el viento, emisiones volcánicas e incendios forestales. Elaboración propia en BioRender.

3. Tendencias de emisiones de PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Puebla

3.1 Análisis de datos sobre emisiones en Puebla entre 2015-2024

Para llevar a cabo el análisis de emisiones de PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Puebla, México, recopilamos datos crudos por hora provenientes de cinco estaciones de monitoreo de calidad del aire desde el 1 de enero de 2015 hasta el 30 de septiembre de 2024. Las cinco estaciones de monitoreo de las que se recopilaron los datos fueron: Agua Santa (Prolongación 11 sur y 121 poniente, Col. Agua Santa, Municipio de Puebla, C.P. 72490), BINE (Blvd. Hermanos Serdán No. 203, Col. Valle del Rey, Municipio Puebla C.P. 72140), Las Ninfas (23 poniente y 15 sur, Col. Santiago, Municipio de Puebla, C.P. 72410), UTP (Calle Mariano Escobedo s/n esq. Francisco I. Madero Col. Joaquín Colombres, Municipio de Puebla, C.P. 72300), Velódromo (Av. Zaragoza S/N entre Periférico Ecológico y Calle de las Flores, Municipio de Coronango. C.P. 72680) (Figura 2A). Estos datos fueron obtenidos a través de la Secretaría de Medio Ambiente Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT), y de la base de datos de SINAICA (Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire), que proporciona información detallada y en tiempo real sobre contaminantes atmosféricos (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2024). El número total de datos analizados en las 5 estaciones de monitoreo para PM_{2.5} de 2015 a 2024 correspondió a 429,179 horas con registros de emisiones, para PM₁₀ se obtuvo un total de 410,650 horas con registros de emisiones. En la Figura 2B-C se observan los porcentajes (%) de datos registrados y sin registro

para PM_{2.5} y PM₁₀.

Los promedios anuales por estación de monitoreo por estación de año de PM_{2.5} y PM₁₀ para Puebla desde 2015 hasta 2024, muestran una tendencia de valores anuales que superan consistentemente los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 (10 µg/m³ y 20 µg/m³, respectivamente). Así como los sugeridos por la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2021) para estas partículas en la atmósfera, siendo 5 µg/m³ y 15 µg/m³ respectivamente, con una tendencia de valores incrementados en las estaciones de invierno y primavera (Figuras 3 y 4).



Figura 2: Ubicación de las cinco estaciones de monitoreo y porcentaje de tipos de datos de calidad del aire en Puebla, México. Datos obtenidos de la SMADSOT y de SINAICA. Valor erróneo incluye valores iguales a 0, representan <1% del total de datos de cada estación de monitoreo para PM_{2.5} y 1-5% para PM₁₀ (barras verdes), los cuales se convirtieron al valor mínimo de cada estación. Elaboración propia en R/RStudio.



Figura 3: Tendencias de emisiones de PM_{2.5} en Puebla, México, de los años 2015-2024. Datos crudos promediados por estación a lo largo de 9 años para 5 estaciones de monitoreo ambiental. Elaboración propia en R/RStudio.



Figura 4: Tendencias de emisiones de PM₁₀ en Puebla, México, de los años 2015-2024. Datos crudos promediados por estación a lo largo de 9 años para 5 estaciones de monitoreo ambiental. Elaboración propia en R/RStudio.

4. Impacto en la Salud de la Exposición a PM_{2.5} y PM₁₀

La evidencia epidemiológica ha demostrado que la exposición a la contaminación del aire, incluyendo PM₁₀ y PM_{2.5}, dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y dióxido de azufre (SO₂), se asocia con un amplio rango de enfermedades no transmisibles (ENT). Entre estos contaminantes, el material particulado ha sido clasificado como un riesgo de clase I para el cáncer de pulmón en humanos (Turner, M.C. et al., 2024). En términos generales, la contaminación por PM es uno de los principales factores de riesgo globales para diversas enfermedades, ya que se ha vinculado con presión arterial alta, riesgos incrementados por el tabaquismo, bajo peso al nacer y partos prematuros (Brauer, M. et al., 2024).

Para reducir el impacto de la contaminación en la salud, la Organización Mundial de la Salud (OMS) actualizó en 2021 sus Directrices Globales de Calidad del Aire,

basadas en décadas de evidencia sobre los efectos negativos de los contaminantes. Sin embargo, aún existe una escasez de estudios en países de ingresos bajos y medios, donde el 77% de las muertes por ENT se producen y la exposición a la contaminación es especialmente elevada. La OMS ha establecido que existe una relación casi lineal entre las concentraciones de PM_{2.5} y el riesgo para la salud, y se han observado efectos incluso a niveles bajos de concentración (<5 µg/m³), lo que subraya la importancia de reducir la contaminación al mínimo (World Health Organization, 2021).

Las ENT se han convertido en la principal causa de muerte a nivel mundial, con una incidencia creciente que representa casi 41 millones de muertes anuales. La contaminación del aire se considera el mayor riesgo ambiental para las ENT, y actualmente, el 99% de la población mundial está expuesta a niveles de calidad del aire que superan los límites recomendados por la OMS (World Health Organization, 2022).

La falta de opciones para reducir la exposición individual y las disparidades sociales agravan el problema, haciendo urgente el desarrollo de políticas de intervención en salud y estrategias de comunicación de riesgos. Sin medidas drásticas, los objetivos para mejorar la calidad del aire y la salud establecidos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas para 2030 serán difíciles de alcanzar.

La exposición a la contaminación del aire afecta a distintos grupos poblacionales. Por ejemplo, más del 98% de los niños en países de ingresos bajos y medios (LMICs, por sus siglas en inglés) están expuestos a niveles de PM_{2.5} que exceden las directrices de calidad del aire (Aithal, S. S. et al., 2023). Esta exposición durante el desarrollo prenatal y postnatal podría tener consecuencias no visibles en la infancia, incrementando el riesgo de enfermedades no transmisibles a lo largo de la vida (Pérrera, F. et al., 2022). Además, la exposición de mujeres embarazadas a PM_{2.5} ha sido vinculada con complicaciones en el embarazo, como el nacimiento prematuro y la muerte fetal, e incluso algunos estudios sugieren una posible relación con problemas de fertilidad (Decrue, F. et al., 2023, Zanini, M. J. et al., 2020).

La exposición crónica a PM_{2.5} se ha asociado con un incremento en enfermedades neurodegenerativas, como el Alzheimer y la demencia vascular, así como en cáncer y trastornos óseos como la osteoporosis (Jain, S., 2024). La osteoporosis es una enfermedad que debilita los huesos, los hace propensos a fracturarse; esta condición ya es conocida como la “enfermedad silenciosa” debido a que suele detectarse sólo tras una lesión y afecta a millones de personas en el mundo. Diversos factores contribuyen a la osteoporosis, como los cambios hormonales, el sedentarismo y el consumo de tabaco y alcohol. Sin embargo, estudios recientes sugieren que la contaminación del aire podría ser un factor adicional. Investigaciones en Estados Unidos, Reino Unido, India y China han revelado que vivir en áreas con altos niveles de contaminación, especialmente de PM_{2.5} y carbono negro, aumenta el riesgo de fracturas y disminuye la densidad ósea. En países como India, donde el uso de estufas tradicionales y la quema de residuos agrícolas agravan la contaminación, esta relación podría tener implicaciones importantes para la salud pública. Los científicos aún investigan cómo los contaminantes del aire dañan los huesos. Entre las teorías, se plantea que el ozono puede bloquear la radiación ultravioleta, reduciendo la producción de vitamina D, esencial para la salud ósea. Además, algunos compuestos en el aire contaminado generan radicales libres que dañan las células y promueven inflamación, afectando los procesos de regeneración ósea (Jain, S., 2024).

Los estudios epidemiológicos en países de altos ingresos han sido fundamentales para establecer una relación causal entre la contaminación del aire y eventos adversos de salud. Sin embargo, en los países de bajos ingresos, donde los niveles de contaminación y la densidad poblacional son más altos, estos estudios son escasos, limitando las estimaciones globales de la carga de enfermedad por exposición prolongada a la contaminación. Para avanzar en esta área, es esencial realizar estudios de seguimiento a largo plazo en estos países de bajos ingresos. Así como mejorar la precisión en la evaluación de la exposición y promover el uso de tecnologías de secuenciación masiva que nos permitan realizar estudios multi-ómicos que nos

permitan comprender la complejidad de los sistemas biológicos y sus interacciones con la contaminación ambiental.

4.1 Exposoma y sus consecuencias sociales

El concepto de Exposoma, sugerido desde el año 2005, se refiere a la totalidad de las exposiciones de fuentes internas y externas, incluidos los agentes químicos, biológicos, físicos y sociales desde la concepción y a lo largo de toda la vida de un individuo. A pesar de que dichas exposiciones pueden ser compartidas entre individuos y grupos, cada uno responde fisiológicamente de manera específica y se ve afectados de manera diferente.

Los estudios centrados en el Exposoma tienen por objeto evaluar las correlaciones entre las exposiciones ambientales y las respuestas biológicas y de salud de una o más personas que viven en un contexto similar (Olmedo-Suárez et al., 2022; Lyon-Caen et al. 2019). El Exposoma está compuesto por tres dominios: el externo general, que examina las exposiciones a nivel de la población (como la contaminación en el aire y el agua); el externo específico, que se ocupa de exposiciones individuales (se miden por cuestionarios); y el interno, que estudia las respuestas biológicas a los factores externos e incluye análisis funcionales, biomoleculares y multi-ómicos (Anesti et al., 2023; Wei et al., 2022).

Las ciencias ómicas, como la transcriptómica y la epigenómica, desempeñan un papel crucial en los estudios del exposoma, ya que permiten investigar cómo las exposiciones ambientales afectan la expresión génica y los mecanismos de regulación genética en el organismo. La transcriptómica se centra en el análisis completo de los ARN transcritos en una célula o tejido en un momento dado, lo cual proporciona información sobre los genes que están activos o inactivos en respuesta a exposiciones específicas, como contaminantes del aire, químicos en el agua o agentes biológicos. Al estudiar los cambios en el perfil de expresión génica, la transcriptómica ayuda

a identificar rutas biológicas y procesos celulares alterados por estas exposiciones, revelando potenciales vínculos con enfermedades crónicas o condiciones de salud específicas.

Por otro lado, la epigenómica explora el conjunto de las modificaciones epigenéticas en forma de modificaciones químicas en el ADN que regulan la expresión génica, sin alterar la secuencia genética subyacente. Estas modificaciones, que incluyen metilación del ADN y modificaciones de histonas, son altamente sensibles a factores ambientales y pueden cambiar la actividad de ciertos genes en respuesta a exposiciones prolongadas o intensas. La Epigenética es fundamental en el contexto del exposoma porque permite entender cómo el ambiente "deja huellas" en el genoma que pueden tener efectos a largo plazo en la salud, incluso transmitiéndose de una generación a otra.

Ambas disciplinas, la transcriptómica y la epigenómica, aportan una comprensión más profunda de las respuestas biológicas al ambiente, ayudando a identificar biomarcadores específicos de exposición y riesgo de enfermedades. Esto no solo mejora la capacidad para predecir efectos de salud a nivel individual y poblacional, sino que también facilita el desarrollo de intervenciones y políticas que puedan mitigar los efectos adversos de las exposiciones ambientales.

5. Políticas y regulaciones: esfuerzos y estrategias de mitigación de los efectos de la contaminación del aire

Desde 1987, la Organización Mundial de la Salud, ha establecido periódicamente lineamientos sobre la calidad del aire que ayuden a los gobiernos y a la sociedad civil a tomar decisiones para reducir la exposición al aire contaminado y mitigar los efectos adversos a la salud. Desafortunadamente, las consecuencias tanto en salud como en ambiente por la contamin

ción del aire parecen afectar cada vez más pues existen limitaciones dentro de los lineamientos que la OMS establece, siendo que no se realizan recomendaciones que incluyan los efectos combinados de distintos tipos de exposiciones en distintos espacios y tiempos. Tampoco menciona recomendaciones específicas en políticas e intervenciones públicas, ya que estas dependen de contextos socioculturales determinados (WHO, 2021). Como claro ejemplo, el objetivo del Acuerdo de París es reducir el incremento de la temperatura global a tal grado de evitar catástrofes socioambientales sin precedentes para antes del 2030. Para esto, sería necesaria la implementación de un conjunto de políticas efectivas y decisivas a nivel de nación. Sin embargo, se sabe que las contribuciones realizadas a la fecha no han alcanzado las reducciones requeridas, pues el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés) ha estimado que resta una brecha media de 23 gigatoneladas de CO₂ para el 2030 (The United Nations Environment Programme [UNEP], 2022). Por lo anterior, surge la pregunta de qué tipo de estrategias o políticas públicas serían las más efectivas para mitigar significativamente las emisiones de contaminantes.

Recientemente, Annika Stechemesser, investigadora del Instituto Potsdam para la Investigación del Impacto Climático en Alemania, junto con su equipo usaron inteligencia artificial para analizar 1500 políticas recopiladas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) implementadas entre 1998 y 2022 en 41 países, encontrando que 63 intervenciones realizadas en 35 países, en conjunto, condujeron a reducciones significativas de hasta 1.8 gigatoneladas de CO₂ (Stechemesser et al., 2024). En este trabajo, los autores concluyeron que es más eficaz utilizar la combinación adecuada de políticas que utilizar muchas de manera individual. Además, identificaron cuatro principales sectores de alto nivel de emisiones: la construcción, la eléctrica, la industria y el transporte. Por lo que las intervenciones combinadas en materia jurídica aplicadas a dichos sectores funcionaron mejor en ciertas regiones y economías. En Noruega, por ejemplo, se prohibió el tránsito de autos con motor de combustión con la paralela

reducción de los costos de los autos eléctricos, lo que motivó la transición al uso de energías más limpias (Larsen et al., 2023). Además, el aumento en impuestos o la implementación de costos fijos del carbono, como medidas independientes, lograron la reducción de emisiones de forma significativa.

La idea de contar con un inventario global de políticas efectivas se ve limitada por la falta de herramientas que evalúen sistemáticamente los efectos de la combinación simultánea de políticas ambientales. El modelo de evaluación basado en aprendizaje automático para identificar políticas efectivas identificó cuatro tipos de políticas en materia de información, precios, regulación y subsidios. Es importante mencionar que, aunque identificar políticas efectivas es crucial para guiar a los responsables del diseño de las intervenciones más significativas, se encontró que las políticas efectivas varían según el desarrollo económico de cada país. Por ejemplo, en las economías en desarrollo, la regulación es la política más poderosa, pues resulta ser efectiva como una política individual, pero lo es también en combinación con las políticas en subsidios, precios e información. En el sector industrial, la fijación de precios es más efectiva en economías desarrolladas, aunque puede mostrar mayor sinergia con otras políticas en economías en desarrollo (Stechemesser et al., 2024). Cabe señalar que en términos de sustentabilidad, el interés de los tomadores de decisiones de una nación por formular políticas ambientales conlleva generar intereses económicos sobre el desarrollo de tecnologías verdes. Así como en la reducción del costo de las tecnologías, lo que resultaría no solo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino también en la disminución de liberación de material particulado al ambiente.

Por lo anterior, el gasto público en ciencia y tecnología es crucial para promover una mejor economía en México. Lo que resalta la necesidad de la participación de más actores en una política activa, en la que no solamente se involucre el gobierno para el diseño de políticas. La participación de la comunidad científica, por ejemplo, sería clave para mejorar estrategias en el diseño de políticas científicas y tecnológicas.

Se sabe que las naciones que han logrado el aumento de sus ingresos y que han contribuido en mejorar la calidad de vida de sus habitantes, lo han realizado a través de la inversión en actividades de investigación y desarrollo que no solo incluye a la investigación aplicada, sino además a la investigación básica y la investigación experimental. Sin embargo, México parece estar lejos de esta tendencia debido a los bajos recursos que el estado destina a la ciencia. Tal como lo evidencian estudios recientes, donde mencionan que en 2020 el presupuesto ejecutado en investigación y desarrollo ascendió apenas al 0.3% del producto interno bruto (PIB) (Villegas et al., 2023). Lo que es una cifra muy alejada a lo estipulado en el artículo 119 de la Ley General de Educación y el artículo 9 BIS de la Ley de Ciencia y Tecnología, donde señalan que el poder Ejecutivo Federal y el gobierno de cada entidad federativa, concurrirán al financiamiento equivalente al 1% del PIB en investigación científica y desarrollo tecnológico. Como consecuencia, México apenas cuenta con 358 investigadores por cada millón de habitantes (Vries W., 2024).

Si sumamos además la disparidad de género, donde del total de la comunidad científica hasta 2023 (41,284 investigadores registrados en el SNI) el 40% fue representada por mujeres (González et al., 2024). Encontramos que no solo se invierte poco en investigación, sino que además el direccionamiento de los proyectos llevados a cabo actualmente se ven sesgados por una falta de participación democrática y por la limitación al derecho humano a la ciencia, amparado por la Constitución en el apartado V del artículo 3º. El derecho humano al disfrute de los beneficios de la ciencia y el desarrollo tecnológico tendría que considerarse como principio base para el diseño de cualquier política científica. De este modo, lograríamos reducir las desigualdades en cualquiera de sus formas, incluyendo las disparidades en la salud relacionadas con la contaminación del aire (Mork et al., 2024).

6. Conclusiones y Perspectivas

6.1 Importancia de la educación, la concientización y el desarrollo de políticas sostenibles

En la actualidad, el mundo entero se enfrenta a importantes desafíos socioambientales, como la creciente presión sobre los ecosistemas, la disminución de la diversidad biológica, el cambio climático, la contaminación, la escasez de agua, la sobrepoblación, el manejo de residuos, las migraciones, la pobreza, las disparidades sociales, la violencia, el desempleo y la explotación laboral. Gudi-Mindermann et al. (2023) afirman que el concepto "socioexposoma" explica de manera más precisa el vínculo entre todos los factores y exposiciones socioambientales, sus implicaciones en la salud, los factores sociales y económicos. Además, dicho concepto reconoce que los determinantes sociales, que varían según las circunstancias temporales y espaciales, tienen un impacto en todos los tipos de exposiciones, lo que resulta en distinciones en la salud desde la infancia temprana (Moccia et al., 2023); por tanto, los estudios del socioexposoma integran la investigación sobre la equidad en la salud y la justicia ambiental para investigar el surgimiento, la perpetuación y la influencia de las desigualdades sociales (Deguen et al., 2022).

El efecto negativo, subestimado, de las enfermedades asociadas a la contaminación en los programas sanitarios sociales es, por tanto, significativo. Las transformaciones socioeconómico-territoriales ocurridas en las grandes ciudades, como en Puebla, presentan como eje explicativo central la industria impulsada desde la década de los 70. Durante 50 años, su impacto ahora se hace visible a través de estudios epidemiológicos, pero faltan análisis científicos multi-escala y marcadores moleculares para abordar desde

el punto de vista médico y científico las dimensiones sociales (y económicas) de generaciones actuales y venideras que presentarán patologías asociadas a la contaminación regional. Los estudios multidisciplinarios son necesarios para reconocer áreas de oportunidad para la toma de decisiones sanitarias oportunas, así como el establecimiento de nuevas líneas de investigación.

La contaminación es costosa a nivel individual y social. Las enfermedades relacionadas con la contaminación causan pérdidas de productividad que reducen el PIB en los países de ingresos bajos-medios hasta en un 2% anual. Las enfermedades relacionadas con la contaminación también generan costos de atención médica que son responsables del 1.7% del gasto anual en salud en los países de ingresos altos y de hasta el 7% del gasto en salud en los países de ingresos medios con alta tasa de contaminación ambiental y desarrollo exponencial (Landrigan et al., 2018). Los costos atribuidos a las enfermedades relacionadas con la contaminación probablemente aumentarán a medida que se identifiquen asociaciones adicionales entre la contaminación y las enfermedades.

6.2 Reflexión sobre la necesidad de estudios multidisciplinarios para mejores diagnósticos, terapias y biomarcadores eposómicos de salud ambiental

La contaminación es la principal causa ambiental de enfermedades humanas y muerte prematura en el mundo (Landrigan et al., 2017). Según la OMS, se estima que 7 millones de muertes prematuras en todo el mundo están asociadas con la contaminación del aire y el agua cada año, principalmente de varios subtipos de cáncer, enfermedades pulmonares, cardiopatías, accidentes cerebrovasculares, hepatitis, insuficiencia renal, infertilidad e infecciones respiratorias

agudas (Organización Mundial de la Salud, 2024). Es importante destacar que un estimado del 24% de las muertes asociadas a la contaminación se pueden prevenir. Desde la perspectiva epidemiológica, las enfermedades causadas por la contaminación causan más muertes que el SIDA, la tuberculosis y la malaria juntos, y 15 veces más que las causadas por guerras o violencia (Organización de las Naciones Unidas, 2022). Desde la perspectiva social, la contaminación mata de manera desproporcionada a los sectores pobres y vulnerables de la sociedad. Las industrias contribuyen en gran medida a la contaminación del aire, el agua y el suelo en México, por una diseminación incontrolada de sustancias altamente tóxicas que inducen enfermedades terminales.

Los estudios multidisciplinarios son necesarios para reconocer áreas de oportunidad para la toma de decisiones sanitarias oportunas, así como el establecimiento de nuevas líneas de investigación, como en el campo de la Epigenética. Debido a que las adaptaciones y cambios epigenéticos en las células son pequeños, potencialmente acumulativos y pueden desarrollarse con el tiempo, puede ser difícil establecer las relaciones de causa-efecto entre factores ambientales, cambios epigenéticos y enfermedades humanas. Por lo tanto, existe una gran necesidad de enfoques sistemáticos para este conjunto de enfermedades. Además, los niños corren un alto riesgo de desarrollar enfermedades asociadas a la contaminación, inclusive la exposición a dosis extremadamente bajas de contaminantes durante ventanas específicas de vulnerabilidad intrauterina, y en la infancia temprana, puede provocar enfermedades severas, discapacidades de por vida y un sensible incremento de muerte infantil. En particular, la exposición neonatal a las toxinas epigenéticas puede influir en la salud adulta en el futuro, debido a las características intrínsecas de estas toxinas, que alteran la regulación

epigenética durante la organogénesis y en general durante el desarrollo.

A pesar de los efectos sustanciales de la contaminación en la salud humana, en la economía y el medio ambiente en Puebla, en México y en el mundo, los efectos de la contaminación no se han analizado con el propósito de proponer nuevas estrategias terapéuticas basadas en estudios epigenéticos integrados con ciencias médicas y ambientales. De ahí la próxima iniciativa gestada desde el Laboratorio Internacional EPIGEN-CONCYTEP-BUAP para la creación de la Red Latinoamericana del Exposoma Humano, tras el 1er Congreso Internacional ENVIRO-EpiHealthMX2024, llevado a cabo en la ciudad de Puebla, México, para discutir esta necesidad desde lo científico y lo social (ENVIRO-EpiHealthMX2024, 2024). En los países de ingresos bajos y medios, los efectos de la contaminación en la salud se subestiman para las estadísticas de morbilidad a nivel internacional. Teniendo en cuenta que el número de muertes prematuras y discapacidades causadas por muchas de las condiciones clínicas asociadas a la contaminación no se cuantifica actualmente en las estimaciones globales, se espera que la carga de morbilidad por la contaminación del aire y el agua ambiental aumente considerablemente. Por lo tanto, existe una gran necesidad de enfoques sistemáticos para el conjunto de enfermedades asociadas al Exposoma Humano. La disección de la relación entre las propiedades tisulares, celulares y subcelulares alteradas, y el fenotipo de enfermedades como el cáncer, podrían explorarse como una estrategia para el desarrollo de nuevos enfoques bioterapéuticos para el diagnóstico y posible tratamiento de esta enfermedad que afecta a grupos social y económicamente vulnerables.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Convenio CONCYTEP (203/2024), Becas de Formación Profesional, VIEP-BUAP (0851-2023), Beca Nacional de Posgrado, CONAHCYT (752965), nombramiento SNI I (294738).

Referencias

- Funk, M. A., Ash, C., Smith, J., Uzogara, E., & Wible, B. (2024). Clearing the air. *Science*, 385(6707), 378-379.
- Meier, M. J., Harrill, J., Johnson, K., Thomas, R. S., Tong, W., Rager, J. E., & Yauk, C. L. (2024). Wintertime investigation of PM10 concentrations, sources, and relationship with different meteorological parameters. *Scientific Reports*, 14(1), 154.
- Zeb, B., Ditta, A., Alam, K., Sorooshian, A., Din, B. U., Iqbal, R., ... & Elshikh, M. S. (2024). Wintertime investigation of PM10 concentrations, sources, and relationship with different meteorological parameters. *Scientific Reports*, 14(1), 154.
- Gavito-Covarrubias, D., Ramírez-Díaz, I., Guzmán-Linares, J., Limón, I. D., Manuel-Sánchez, D. M., Molina-Herrera, A., ... & Rubio, K. (2024). Epigenetic mechanisms of particulate matter exposure: air pollution and hazards on human health. *Frontiers in Genetics*, 14, 1306600.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2024). Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA). <https://sinaica.inecc.gob.mx/>
- SECRETARÍA DE SALUD. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM10 y PM2.5. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de octubre de 2021.
- World Health Organization (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
- Turner, M. C., Andersen, Z. J., Baccarelli, A., Diver, W. R., Gapstur, S. M., Pope III, C. A., ... & Cohen, A. (2020). Outdoor air pollution and cancer: An overview of the current evidence and public health recommendations. *CA: a cancer journal for clinicians*, 70(6), 460-479.
- Brauer, M., Roth, G. A., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abate, K. H., Abate, Y. H., ... & Amani, R. (2024). Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and 811 subnational locations, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet*, 403(10440), 2162-2203.
- World Health Organization, "Billions of people still breathe unhealthy air: New WHO data" (WHO, 2022); <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>.

- Aithal, S. S., Sachdeva, I., & Kurmi, O. P. (2023). Air quality and respiratory health in children. *Breathe*, 19(2).
- Perera, F., & Nadeau, K. (2022). Climate change, fossil-fuel pollution, and children's health. *New England Journal of Medicine*, 386(24), 2303-2314.
- Decrue, F., Townsend, R., Miller, M. R., Newby, D. E., & Reynolds, R. M. (2023). Ambient air pollution and maternal cardiovascular health in pregnancy. *Heart*, 109(21), 1586-1593.
- Zanini, M. J., Domínguez, C., Fernández-Oliva, T., Sánchez, O., Toda, M. T., Foraster, M., ... & Llurba, E. (2020). Urban-related environmental exposures during pregnancy and placental development and preeclampsia: a review.
- Jain, S. (2024). Down to the bone. *Science* (New York, NY), 385(6707), 359-361.
- Olmedo-Suárez, M. Á., Ramírez-Díaz, I., Pérez-González, A., Molina-Herrera, A., Coral-García, M. Á., Lobato, S., ... & Rubio, K. (2022). Epigenetic regulation in exposome-induced tumorigenesis: emerging roles of ncRNAs. *Biomolecules*, 12(4), 513.
- Lyon-Caen, S., Siroux, V., Lepeule, J., Lorimier, P., Hainaut, P., Mossuz, P., ... & SEPAGES Study Group. (2019). Deciphering the impact of early-life exposures to highly variable environmental factors on foetal and child health: design of SEPAGES couple-child cohort. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(20), 3888.
- Wei, X., Huang, Z., Jiang, L., Li, Y., Zhang, X., Leng, Y., & Jiang, C. (2022). Charting the landscape of the environmental exposome. *IMeta*, 1(4), e50.
- UNEP. (2022). Emissions Gap Report 2022: The Closing Window. Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies. UN.
- Stechemesser A, Koch N, Mark E, Dilger E, Klösel P, Menicacci L, Nachtigall D, Pretis F, Ritter N, Schwarz M, Vossen H, Wenzel A. Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades. *Science*. 2024 Aug 23;385(6711):884-892. doi: 10.1126/science.adl6547. Epub 2024 Aug 22. PMID: 39172830.
- Larsen, M. L., & Dupuy, K. (2023). Greening industry: Opportunities and challenges in electricity access for Norwegian industry firms. *Journal of Cleaner Production*, 396, 136534.
- Villegas, E. S. L. (2023). La política de innovación como determinante del crecimiento económico en los inicios del siglo XXI: caso México y Corea del Sur. *China Global Review*, 1(2), 76-102.
- Vries, W. D. (2024). Cien números sobresalientes. *Revista mexicana de investigación educativa*, 29(100), 25-31.

- González, M. D. L. Á. A. (2024). V. Condiciones laborales de las investigadoras en México, un enfoque desde la perspectiva de género. Juan Carlos Ramos Corchado Director del Centro Universitario UAEM Texcoco.
- Mork, D., Delaney, S., & Dominici, F. (2024). Policy-induced air pollution health disparities: Statistical and data science considerations. *Science* (New York, N.Y.), 385(6707), 391–396.
- Gudi-Mindermann, H., White, M., Roczen, J., Riedel, N., Dreger, S., & Bolte, G. (2023). Integrating the social environment with an equity perspective into the exposome paradigm: a new conceptual framework of the Social Exposome. *Environmental Research*, 233, 116485.
- Moccia, C., Pizzi, C., Moirano, G., Popovic, M., Zugna, D., d'Errico, A., ... & Maule, M. (2023). Modelling socioeconomic position as a driver of the exposome in the first 18 months of life of the NINFEA birth cohort children. *Environment International*, 173, 107864.
- Deguen, S., Amuzu, M., Simoncic, V., & Kihal-Talantikite, W. (2022). Exposome and social vulnerability: an overview of the literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3534.
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J., Adeyi, O., Arnold, R., Baldé, A. B., ... & Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The lancet*, 391(10119), 462-512.
- Organización Mundial de la Salud. (2024). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Recuperado el 7 de noviembre de 2024 de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización de las Naciones Unidas. (2022, 7 de febrero). La contaminación del aire provoca siete millones de muertes cada año. Noticias ONU. Recuperado de <https://news.un.org/es/story/2022/02/1504162>
- ENVIRO-EpiHealthMX2024 (2024). Recuperado el 6 de noviembre de 2024, de <https://enviroepihealth.com/>

HELICOBACTER PYLORI: ¿ALIADA O ADVERSARIA?

HELICOBACTER PYLORI: ALLY OR ADVERSARY?

Anyuri Hernández Rojas1*
Claudia Yoselin Juárez Flores1
Ramiro José González Duarte2

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla,
Complejo Regional Nororiental de la Benemérita Universidad
Autónoma de Puebla

Autor de correspondencia: Anyuri Hernández Rojas 2722461664
*anyuri.hernandez@upaep.edu.mx
claudiayoselin.juarez@upaep.edu.mx
ramiro.gonzalezd@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0000-9506-7977>
<https://orcid.org/0009-0003-3742-0367>
<https://orcid.org/0000-0002-6041-9888>

Resumen

La bacteria *Helicobacter pylori* es famosa por su papel en el desarrollo de enfermedades gástricas, como la gastritis y las úlceras, y especialmente por su relación con el cáncer gástrico. Sin embargo, estudios recientes han planteado la posibilidad de que esta bacteria también tenga un rol protector. ¿Es posible que, a pesar de su mala reputación, *H. pylori* pueda contribuir con la salud en algunos casos? Investigaciones sugieren que la presencia de *H. pylori* podría proteger contra ciertas enfermedades autoinmunes y alérgicas. Además, aunque su presencia se ha vinculado con el riesgo de cáncer, su ausencia en el cuerpo también parece influir en la salud digestiva de los pacientes. Esto plantea el dilema de si debería eliminarse esta bacteria en todos los casos, o si algunos pacientes podrían beneficiarse de mantenerla. En una revisión sistemática de estudios, se seleccionaron 20 investigaciones clave que incluyeron revisiones y ensayos clínicos. Los hallazgos recomiendan que cada caso debe evaluarse de forma individual, tomando en cuenta los factores de riesgo de cada paciente. En caso de optar por la eliminación de *H. pylori*, es crucial valorar el cumplimiento de la terapia y sus posibles efectos secundarios.

Palabras clave: *Helicobacter pylori*, erradicación, beneficios, consecuencias

Abstract

The bacterium *Helicobacter pylori* is famous for its role in the development of gastric diseases, such as gastritis and ulcers, and especially for its association with gastric cancer. However, recent studies have raised the possibility that this bacterium also has a protective role. Is it possible that, despite its bad reputation, *H. pylori* contributes to health in some cases? Research suggests that the presence of *H. pylori* may protect against certain autoimmune and allergic diseases. In addition, although its presence has been linked to cancer risk, its absence in the body also appears to influence the digestive health of patients. This raises the dilemma of whether this bacterium should be eliminated in all cases, or whether some patients might benefit from keeping it. In a systematic review of studies, 20 key investigations ranging from reviews to clinical trials were selected. The findings suggest that each case should be evaluated on an individual basis, taking into account each patient's risk factors. If *H. pylori* elimination is chosen, it is crucial to assess compliance with therapy and possible side effects.

Keywords: *Helicobacter pylori*, eradication, benefits, consequences

Introducción

Helicobacter pylori (*H. pylori*) es una bacteria que se transmite de persona a persona por vía oral o a través de las heces fecales. Es reconocida a nivel mundial por el impacto negativo que puede tener en el sistema digestivo. *“La infección causa gastritis crónica y aumenta el riesgo de úlcera péptica, adenocarcinoma gástrico y linfoma del tejido linfoide asociado a las mucosas.”* (FitzGerald et al., 2021).

Sin embargo, diversos estudios han evidenciado que podría tener una función beneficiosa como parte integral de la flora intestinal normal, ya que se sugiere que *“este microorganismo actúa como comensal oportunista e incluso simbiote”* (Reshetnyak et al., 2021). Cada vez son más las investigaciones que hablan sobre los beneficios que esta bacteria puede traer a la vida humana. *“La perspectiva mencionada está siendo estudiada por investigadores en el mundo y hay datos recientes que sugieren que la colonización por H. pylori podría tener efectos biológicos beneficiosos para el huésped en algunos casos.”* (González Duarte et al., 2024).

Se ha demostrado que su presencia en la flora intestinal contribuye a efectos beneficiosos para el ser humano, pues *“H. pylori regula el microbiota intestinal, brinda protección contra trastornos autoinmunes y alérgicos y desempeña un posible papel protector en la enfermedad inflamatoria intestinal.”* (Stanislav Sitkin et al., 2022).

En la actualidad, la eliminación de *H. pylori* se ha vuelto más común debido a sus efectos perjudiciales en el ser humano. No obstante, el principal problema radica en las consecuencias de su eliminación, que *“provoca un desequilibrio en la microbiota con un aumento de Proteobacterias y una disminución de Bacteroidetes y Actinobacterias”* (Stanislav Sitkin et al., 2022), que puede contribuir al desarrollo de lesiones gástricas precancerosas e incluso cáncer. Por otro lado, el uso de antibióticos y otros medicamentos que funcionan para disminuir la producción de ácido en el estómago (antisecretores) para el tratamiento contra *H. pylori*

pueden ocasionar diversos efectos secundarios. *“La erradicación repetida puede causar diarrea asociada a antibióticos, incluida diarrea y colitis graves asociadas a Clostridium difficile y colitis hemorrágica.”* (Stanislav Sitkin et al., 2022).

Es importante considerar que el desarrollo de trastornos gástricos no se limita únicamente a la presencia de la infección de esta bacteria, sino que también está influenciado por otras variables. *“No sólo los factores de virulencia de H. pylori y el potencial oncogénico de cepas específicas de H. pylori, participan en el desarrollo de lesiones gástricas, sino también la genética y el origen étnico de la población huésped, sus hábitos dietéticos, tabaquismo, consumo de alcohol, nivel socioeconómico y coinfección que modulan la respuesta inmune potencialmente protectora T helper tipo 2”.* (Stanislav Sitkin et al., 2022).

Existe una perspectiva negativa de *H. pylori*, por lo que se desea actualizar el panorama médico, científico y de la población en general del constante cambio de la bacteria. El propósito principal de esta revisión sistemática, es analizar distintos artículos experimentales que exponen cuáles son los beneficios asociados con la presencia de *H. pylori*, cuáles son las posibles consecuencias negativas que pueden surgir tras su eliminación en casos donde no sea necesario, y finalmente qué factores se necesitan para el desarrollo de alteraciones del estómago, incluido el cáncer. Asimismo, se busca promover un enfoque individualizado en cada paciente, teniendo en cuenta siempre la relación entre riesgos y beneficios, ya que la eliminación de *H. pylori* no debe considerarse obligatoria, sino una decisión individualizada, dada la variedad de repercusiones mencionadas anteriormente.

Revisión de literatura científica

De nuestra búsqueda inicial se obtuvieron 20 artículos, de los cuales 11 fueron los estudios experimentales relevantes

para el tema de estudio, tal como se muestra en la tabla 1. De estos, 11, 8 demuestran el posible papel beneficioso de la bacteria en la flora intestinal del ser humano. Los 3 restantes hablan sobre las consecuencias negativas que trae el eliminar la bacteria, teniendo como consecuencia principal un desequilibrio de la flora intestinal. Dicho esto, nuestra hipótesis concuerda con lo que opina la mayoría de los autores, que subrayan la relevancia del tema de estudio tanto para la comunidad científica como para futuras investigaciones.

“Se ha descrito que H. pylori podría regular la microbiota gastrointestinal y proteger contra algunos trastornos alérgicos y autoinmunes y la enfermedad inflamatoria intestinal. En ese caso, la erradicación de H. pylori tendría diversos efectos adversos y alteraría la microbiota gastrointestinal provocando disbiosis; por lo tanto, no sería recomendable en todos los casos”. (González Duarte et al., 2024).

Todos los artículos seleccionados son estudios experimentales, en los cuales se evaluó el riesgo relativo (medida de asociación que indica la probabilidad de que un evento ocurra o no en una población) mostrando que la bacteria sí es un factor protector para enfermedades autoinmunes, enfermedades del sistema digestivo (enfermedad por reflujo gastroesofágico, enfermedad inflamatoria intestinal) y enfermedades de la piel (dermatitis). Además, en el artículo de Chen et al. (2021) se estudió el riesgo relativo tras la eliminación de la bacteria con base en las lesiones del esófago (adenocarcinoma y esófago de Barret), resultando un riesgo relativo menor a uno, y se concluyó que la eliminación de la bacteria, sí se considera un factor de riesgo para el desarrollo de dichas lesiones. En el artículo de Öztekin et al. (2021) se analizó la participación de *H. pylori* en el desarrollo de lesiones precancerosas del estómago, y de igual manera se concluyó que al eliminar la bacteria existe un riesgo del desarrollo de cáncer gástrico. Asimismo, se mencionó que se necesitan más estudios sobre su participación en esta enfermedad.

Resultados clave de la

revisión

Tabla 1. Principales hallazgos de la literatura científica sobre *Helicobacter pylori*

Autores	Año	Finalidad	Resultados	Conclusiones
Reshetnyak V et al.	2021	Explicar las consecuencias de la eliminación de <i>H. pylori</i> y considerarla como bacteria que se vuelve dañina en personas con defensas bajas.	Se plantea una relación en donde la ausencia de <i>H. pylori</i> favorece la aparición de enfermedades como: asma, dermatitis, Enfermedad Inflamatoria Intestinal y Enfermedad por Reflujo Gastroesofágico.	Se necesita un análisis exhaustivo y evaluar su función en la flora intestinal.
Maeda, T et al.	2022	Identificar el papel de <i>H. pylori</i> en enfermedades del estómago y el intestino, así como sus consecuencias mediante su análisis genético	Se muestra un cambio en las poblaciones de bacterias beneficiosas y no beneficiosas para el ser humano tras la infección por <i>H. pylori</i> .	<i>H. pylori</i> alteró las flora intestinal en el estómago e intestino.
Chen, C et al	2021	Revisar la participación de <i>H. pylori</i> como parte de la flora intestinal y su impacto sobre el estómago e intestino grueso.	Se demuestra la asociación de <i>H. pylori</i> con alteraciones en el esófago como el esófago de Barret y cáncer de estómago.	Se necesitan estudios en la evolución de las vías subyacentes de la flora intestinal en el desarrollo de cáncer.

Sitkin, S et al.	2022	Relatar el papel de la invasión de <i>H. Pylori</i> en la infancia media-da por células de nuestro sistema inmune demon-strando su efecto bené-fico	Se de-mostró que tras eliminar <i>H. pylori</i> , hay una disminu-ción en bacterias benefi-ciosas en el estóma-go, un aumento en bacterias no benefi-ciosas a corto e inter-medio plazo.	La erradi-cación debe ser siempre consi-derada en la relación ries-go-bene-ficio de cada indivi-duo.
Niu, Z et al.	2021	Anali-zar el impacto de la te-rapia de elimina-ción de <i>H. pylori</i> median-te un estudio de casos y contro-les.	Se observó que en el grupo de pacien-tes que no respon-dieron al trata-miento había una mayor cantidad de bacterias dañinas del tipo Proteo-bacteria, y menos bené-ficas, llamadas Actino-bacte-rias. En cambio, en el grupo que tuvo éxito en el trata-miento, predo-minaban otros tipos de bac-terias, como <i>Rhodo-coccus</i> , <i>Lactoba-cillus</i> y <i>Sphingo-monas</i> , bacterias buenas para una adecua-da flora intestinal.	Siempre se debe evaluar si es conve-niente elimi-narlo, consi-derando los riesgos y bene-ficios para cada perso-na.

La relación entre la eliminación de *H. pylori* y un desequilibrio de la flora intestinal mostró el impacto sobre la

disminución o aumento de ciertos tipos de bacterias que no son beneficiosas, lo que predispone al desarrollo de lesiones a nivel del esófago y del estómago. La investigación demostró que existe una relación positiva entre ambas variables.

Helicobacter pylori y la flora intestinal: el inesperado papel de esta bacteria en el intestino

En los estudios revisados se considera que *H. pylori* desempeña un papel importante en mantener el equilibrio de la flora intestinal y en la salud general del ser humano, siendo estas cualidades objeto de numerosas investigaciones. Se sugiere que esta bacteria también desempeña un papel beneficioso a nivel del sistema inmune, y se le ha asociado a una protección contra el desarrollo de Enfermedad Inflamatoria Intestinal (EII), además de su papel beneficioso en otras enfermedades.

En los estudios experimentales consul-tados se observó que tras la eliminación de *H. pylori*, hay una disminución en la población de bacterias beneficiosas como Bacteroidetes y Actinobacterias, seguido de un aumento de bacterias perjudiciales como Proteobacterias, en donde el ser humano se vuelve vulnerable a cambios estructurales del estómago. Este desequilibrio es un factor de riesgo para el desarrollo de lesiones cancerosas gástricas. Lo anterior se ilustra de manera más clara en la figura 1.



Figura 1. Consecuencias del tratamiento de eliminación de *H. Pylori*.

El impacto de eliminar *Helicobacter pylori* en tu salud

La eliminación de *H. Pylori* tras el tratamiento ha generado repercusiones en la salud humana. Los tratamientos utilizados para su eliminación incluyen antibióticos e inhibidores de la bomba de protones, los cuales causan efectos secundarios como diarrea, náuseas, vómitos e indigestión. Estos efectos pueden afectar la tolerancia al tratamiento y la calidad de vida del paciente. Además, el uso prolongado y frecuente de antibióticos, así como un mal cumplimiento del tratamiento, ha llevado al desarrollo de resistencia antibiótica, con falta de respuesta al tratamiento, requiriendo el uso de combinaciones de antibióticos más agresivas.

¿Qué factores desencadenan este problema de salud?

Es necesario recalcar que para el desarrollo de alteraciones gástricas se necesitan más factores predisponentes. *H. pylori* al ser una bacteria de la flora intestinal, ejerce su función beneficiosa pero también tiene su contraparte, enfatizando que se necesitan factores de riesgo que predisponen a la aparición de dichas alteraciones.

Las alteraciones genéticas del ser humano influyen en la probabilidad y progresión de la enfermedad. La dieta también participa, pues el consumo excesivo de alimentos ahumados, salados, encurtidos y procesados, se ha asociado con un mayor riesgo.

El tabaquismo y alcoholismo dañan a las capas del estómago y aumenta la susceptibilidad a otros carcinógenos dietéticos y ambientales. La historia médica personal como la gastritis crónica, anemia perniciosa y Enfermedad de Menetrier también contribuyen al riesgo de desarrollo del cáncer gástrico. “La enfermedad de Ménétrier es una gastropatía

hipertrófica muy infrecuente, asociada a hipoproteïnemia y de etiología desconocida. Es una condición preneoplásica, ya que se asocia a cáncer gástrico en un 10-15% de los casos”. (Ramia, JM, 2007).

Se ha observado que el lugar de origen es crucial en la presencia de cáncer gástrico. “Existe una amplia variación geográfica en su presentación. Más de la mitad de los casos se concentran en Japón, Corea y China. También es un cáncer común en Sudamérica, Europa del Este y algunos países del Oriente Medio y, en cambio, es poco frecuente en Europa, Estados Unidos, Australia y África. Estas diferencias se deben principalmente a factores genéticos y ambientales, como el tipo de alimentación”. (Sociedad Española de Oncología Médica, 2019). Otros factores como la edad y el género interfieren en la probabilidad para el desarrollo del cáncer de estómago.

Helicobacter pylori: el efecto secundario de eliminar esta bacteria en la salud

Tras la eliminación de *H. pylori*, una preocupación es el riesgo de provocar enfermedad por reflujo gastroesofágico (ERGE) y cáncer de esófago debido a que esto elimina algunos tipos de bacterias beneficiosas. En el metaanálisis de Zhao et al (2020) se demostró que la terapia de eliminación provocó ERGE erosiva, presentando un riesgo relativo de 1.67, indicando que su eliminación sí es un factor de riesgo para el desarrollo de ERGE.

Respecto a la enfermedad inflamatoria intestinal (EII) en el estudio realizado por Wu et al. (2021) se demostró un riesgo relativo de 0.48 en pacientes que presentaban infección por *H. pylori* y una EII por lo que se concluyó que la infección fue un factor protector para el desarrollo de la enfermedad.

Los estudios realizados por Chen y Blaser (2007, 2008) sugirieron una asociación entre la infección por *H. pylori* con el asma en la infancia y la rinitis alérgica. Se estableció que la adquisición de *H.*

pylori en la infancia se asocia con riesgos reducidos de asma y alergia, presentando un riesgo relativo de 0.58 en pacientes en los cuales se detectó *H. pylori* y que presentaban asma de forma temprana ($\leq$ 5 años), por lo que se determinó como factor protector.

Conclusiones

En los estudios consultados se demostró que la eliminación de *H. pylori* trae consigo consecuencias, pues la bacteria participa como factor protector contra el

desarrollo de diferentes enfermedades.

Si bien la presencia de *H. pylori* no es única para el desarrollo de cáncer, tampoco lo hace su ausencia. Por estas razones se sugiere que su eliminación no debe ser considerada en todos los pacientes tras una infección, sino que deben individualizarse los factores de riesgo, y en caso de decidir su eliminación, tomar medidas sobre el cumplimiento estricto de la terapia, tomando en cuenta efectos secundarios y consecuencias.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

A UPAEP y a las y los organizadores del RD-ICUAP por generar espacios de aprendizaje científico para quienes nos interesa la ciencia y la investigación. A las y los profesores de la institución que se esforzaron por brindarnos la mejor enseñanza y que fomentaron la investigación en sus alumnos, especialmente al D. en C. Ramiro José González Duarte, docente en la BUAP, que nos apoyó para plantear y revisar este trabajo.

Referencias

- Sociedad Española de Oncología Médica. (2019). Cáncer gástrico. SEOM: Sociedad Española de Oncología Médica. Recuperado de: <https://seom.org/info-sobre-el-cancer/estomago?showall=1&showall=1>
- Chen, C. C., Liou, J. M., Lee, Y. C., Hong, T. C., El-Omar, E. M., & Wu, M. S. (2021). La interacción entre el *Helicobacter pylori* y la microbiota gastrointestinal. *Microbios Intestinales*, 13(1), 1-22. <https://doi.org/10.1080/19490976.2021.1909459>
- Du, L., Chen, B., Cheng, F., Kim, J., & Kim, J. J. (2024). Effects of *Helicobacter pylori* Therapy on Gut Microbiota: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Digestive Diseases*, 42(1), 102-112. <https://doi.org/10.1159/000527047>
- Engelsberger, V., Gerhard, M., & Mejías-Luque, R. (2024). Effects of *Helicobacter pylori* infection on intestinal microbiota, immunity and colorectal cancer risk. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, Article 1339750. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1339750>
- FitzGerald, R., & Smith, S. M. (2021). An Overview of *Helicobacter pylori* Infection. *Methods in Molecular Biology*, 2283, 1-14. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1302-3_1
- González Duarte, R. J., Cázares Ordoñez, V., Meza Sampedro, L. N., Pérez Cantellano, K., & Hernández Rojas, A. (2024). *Helicobacter pylori*: la enfermedad, la nutrición y la microbiota. *Revista de ciencia básica, humanidades, arte y educación*, 2(5), 66-70. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11062079>
- Guo, Y., Cao, X. S., Guo, G. Y., Zhou, M. G., & Yu, B. (2022). Effect of *Helicobacter pylori* Eradication on Human Gastric Microbiota: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 12, Article 899248. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.899248>

- Maeda, T., Zai, H., Fukui, Y., Kato, Y., Kumade, E., Watanabe, T., et al. (2022). Impact of *Helicobacter pylori* infection on fluid duodenal microbial community structure and microbial metabolic pathways. *BMC Microbiology*, 22(1), 1–9. Recuperado de: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=154705711&lang=es&site=eds-live>
- Malnick, S. D., Melzer, E., Attali, M., Duek, G., & Yahav, J. (2021). *Helicobacter pylori*: friend or foe? *World Journal of Gastroenterology*, 20(27), 8979–8985. <https://doi.org/10.3748/wjg.v20.i27.8979>
- Manuel Ramia, J., Sancho, E., Lozano, Ó., María Santos, J., & Domínguez, F. (2007). Enfermedad de Ménétrier y cáncer gástrico. *Cirugía Española*, 81(3), 153–154.
- Miller, A. K., & Williams, S. M. (2021). *Helicobacter pylori* infection causes both protective and deleterious effects in human health and disease. *Genes & Immunity*, 22(4), 218–226. <https://doi.org/10.1038/s41435-021-00146-4>
- National Cancer Institute. (2013). *Helicobacter pylori* and Cancer. Recuperado de <https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/infectious-agents/h-pylori-fact-sheet>
- Niu, Z. Y., Li, S. Z., Shi, Y. Y., & Xue, Y. (2021). Effect of gastric microbiota on quadruple *Helicobacter pylori* eradication therapy containing bismuth. *World Journal of Gastroenterology*, 27(25), 3913–3924. <https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i25.3913>
- Ozbey, G., Sproston, E., & Hanafiah, A. (2020). *Helicobacter pylori* Infection and Gastric Microbiota. *Euroasian Journal of Hepato-Gastroenterology*, 10(1), 36–41. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10018-1310>
- Öztekin, M., Yılmaz, B., Ağagündüz, D., & Capasso, R. (2021). Overview of *Helicobacter pylori* Infection: Clinical Features, Treatment, and Nutritional Aspects. *Diseases*, 9(4), 66. <https://doi.org/10.3390/diseases9040066>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.3390/diseases9040066>

Reshetnyak, V. I., Burmistrov, A. I., & Maev, I. V. (2021). *Helicobacter pylori*: Commensal, symbiont or pathogen? *World Journal of Gastroenterology*, 27(7), 545-560. <https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i7.545>

Schubert, J. P., Rayner, C. K., Costello, S. P., Roberts-Thomson, I. C., Forster, S. C., & Bryant, R. V. (2022). *Helicobacter pylori*: Have potential benefits been overlooked? *JGH Open*, 6(11), 735-737. <https://doi.org/10.1002/jgh3.12842>

Sheh, A., & Fox, J. G. (2013). The role of the gastrointestinal microbiome in *Helicobacter pylori* pathogenesis. *Gut Microbes*, 4(6), 505-531. <https://doi.org/10.4161/gmic.26205>

Sitkin, S., Lazebnik, L., Avalueva, E., Kononova, S., & Vakhitov, T. (2022). Gastrointestinal microbiome and *Helicobacter pylori*: Eradicate, leave it as it is, or take a personalized benefit-risk approach? *World Journal of Gastroenterology*, 28(7), 766-774. <https://doi.org/10.3748/wjg.v28.i7.766>

Talebi Bezmin Abadi, A. (2014). *Helicobacter pylori*: A Beneficial Gastric Pathogen? *Frontiers in Medicine*, 1, Article 26. <https://doi.org/10.3389/fmed.2014.00026>

Weng, C. Y., Xu, J. L., Sun, S. P., Wang, K. J., & Lv, B. (2021). *Helicobacter pylori* eradication: Exploring its impacts on the gastric mucosa. *World Journal of Gastroenterology*, 27(31), 5152-5170. <https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i31.5152>

Zheng, W., Miao, J., Luo, L., Long, G., Chen, B., Shu, X., et al. (2021). The Effects of *Helicobacter pylori* Infection on Microbiota Associated With Gastric Mucosa and Immune Factors in Children. *Frontiers in Immunology*, 12, Article 625586. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.625586>

AGRICULTURA FAMILIAR COMO FORTALECIMIENTO AL SISTEMA AGROALIMENTARIO EN EL SUR DE TLAXCALA: ANTE LA PANDEMIA DEL COVID-19

FAMILY FARMING AS A STRENGTHENING OF THE AGRIFOOD SYSTEM IN THE SOUTH OF TLAXCALA: IN FACE OF THE COVID-19 PANDEMIC

Yolanda Morales Martínez *

RECIBIDO: 5/11/2024

REVISADO: 3/06/25

PUBLICADO 30 DE AGOSTO DE 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHAPINGO

*Autor de correspondencia: ymm.morales@gmail.com, 5533444241

<https://orcid.org/0000-0003-0197-7270>

Resumen

El objetivo de esta investigación fue resaltar los beneficios de la agricultura familiar con producción del maíz ante la pandemia del COVID-19 en cinco municipios del sur del estado de Tlaxcala: San Pablo del Monte, Tenancingo, Papalotla de Xicohténcatl, Xicohtzinco y Zacatelco, en tenencia de tierra: las dos primeras pequeñas propiedades y los tres últimos ejidos. Además, conocer las bases principales que tiene esta actividad agrícola, con el fin de proponer que esta fortalece el sistema agroalimentario del sur de Tlaxcala ante el impacto urbano. Esto se realizó a través de la percepción de los campesinos/productores a partir de entrevistas en profundidad, grupos focales y datos estadísticos de instituciones de gobierno para conocer qué impacto tuvo esta pandemia en la agricultura. El COVID-19 no obstaculiza la actividad agrícola con apoyo familiar, actualmente conocida como Agricultura Familiar, al contrario, la fortalece. De esta manera, la agricultura familiar está fortaleciendo el sistema agroalimentario al contribuir a la seguridad alimentaria y prevenir la pobreza; especialmente en la producción y distribución de maíz como grano básico en el sur tlaxcalteca.

Palabras clave: Agricultura familiar, seguridad alimentaria, sistema agroalimentario, maíz.

Abstract

The objective of this research was to highlight the benefits of family farming with corn production in the face of the COVID-19 pandemic in five municipalities in the southern state of Tlaxcala: San Pablo del Monte, Tenancingo, Papalotla de Xicohténcatl, Xicohtzinco, and Zacatelco, in land tenure: the first two small properties and the last three ejidos. In addition, to know the main bases of this agricultural activity, in order to propose that it strengthens the agri-food system in the south of Tlaxcala in the face of urban impact. This was achieved through the perception of peasants/producers, based on in-depth interviews, focus groups, and statistical data from government institutions, to understand the impact of the pandemic on agriculture. COVID-19 does not hinder family-supported farming, now known as Family Farming; on the contrary, it strengthens it. In this way, family farming is strengthening the agri-food system by contributing to food security and preventing poverty, especially in the production and distribution of corn as a staple grain in southern Tlaxcala.

Keywords: Family farming, food security, agri-food system, corn.

A finales del siglo XX y principios del siglo XXI, las transformaciones rurales han sido notables a nivel nacional. Introducirse en el medio rural confiere percepciones desde diversos ángulos de la realidad social; por lo cual, en esta investigación se desarrolla como concepto principal la agricultura familiar que tiene como bases principales: la seguridad alimentaria y evitar la pobreza. El tema de esta investigación se basa en los acontecimientos de la década de los ochenta del siglo pasado, cuando se presentaron intensos cambios en la política agraria debido al modelo neoliberal y a la globalización, lo que dejó a un lado al Estado benefactor y tuvo un fuerte impacto negativo en el agro mexicano. En el gobierno salinista se expide la Ley Agraria publicada en el Diario Oficial de la Federación el 26 de febrero de 1992, en donde se modificó el artículo 27 constitucional y la Reforma Agraria, finalizando el reparto de las tierras. Esto permitió la llegada del Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares (PROCEDE), que, según la perspectiva oficial, es el programa más trascendental en el campo mexicano para obtener certidumbre en la tenencia de tierra y libertad, para decidir sobre su uso y destino. En realidad, fue una puerta de entrada para la venta del ejido en zonas cercanas a las ciudades. De tal manera, la Reforma Agraria Neoliberal tuvo un impacto fuerte al eliminar una parte de los ejidos como propiedad social, para lograr un control y una dependencia más directa del país dominante hacia el dominado —México—, como una forma estratégica.

La agricultura familiar es una actividad agrícola que se ha llevado a cabo de generación en generación en el sur de Tlaxcala. Este tipo de agricultura fue perdiendo la prioridad que alguna vez tuvo; a lo largo del siglo XX, se percibió como agricultura campesina. Ha sido marginada, subordinada y, sobre todo, sumida en la pobreza al no formar parte del sistema capitalista; es decir, no está incorporada al mercado o lo está solo parcialmente. La agricultura campesina fomenta el conocimiento endógeno en las comunidades para la subsistencia familiar, un modo de

vida que se ha mantenido durante años, basado en el núcleo familiar, produciendo alimentos sanos y preservando el ambiente. Es necesario revalorar esta actividad agrícola y mencionarla como agricultura familiar, para conocer los beneficios que genera. Para ello, en este trabajo se estudiaron cinco municipios del sur del Estado de Tlaxcala: San Pablo del Monte, Tenancingo, Papalotla de Xicohténcatl, Xicohtzinco y Zacatelco, que se encuentran en la cuarta zona metropolitana Puebla-Tlaxcala.

Es necesario comprender la actividad agrícola en los municipios señalados y mostrar la distribución, organización y tipo de producción al interior de las unidades familiares del sur de Tlaxcala, ante la pandemia del COVID-19, ya que esto ayudó a mitigar su impacto en la alimentación. Esto nos permite preguntarnos: ¿Cuáles fueron las características principales del cultivo de maíz en el sur del estado de Tlaxcala durante la pandemia de COVID-19? El objetivo es demostrar los beneficios de la agricultura familiar y la producción prioritaria de los pobladores ante el coronavirus, a través de las percepciones de los agricultores y datos estadísticos para argumentar que esta agricultura fortalece el sistema agroalimentario del sur de Tlaxcala. La idea partió de conservar la actividad agrícola contextualizada como campesina y posicionarla como agricultura familiar, una forma más apropiada de enfrentar la crisis económica, social y ambiental, así como la pandemia del COVID-19.

La agricultura familiar y sus bases principales

A inicios de este siglo XXI se generaron innumerables cambios sociales en todas partes del mundo, especialmente resulta de interés social concientizar positivamente a la población mundial sobre la importancia de la vida rural, que se confronta con la vida urbana. Resulta indispensable entonces dar a conocer las actividades agrícolas y apoyarlas en cuanto a su papel en el manejo sostenible de los recursos naturales y, por lo tanto,

su rol principal en la producción de aire puro, agua, biodiversidad, conservación de suelos y paisaje (Chiriboga, 2010). Como parte de una mayor visibilidad, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) declaró al 2014 como el Año Internacional de la Agricultura Familiar, lo que posibilitó a las familias rurales:

Dejar de visibilizarse como pobres y atraídos al tener pequeña parcela no quiere decir que sean ineficientes o pobres, siendo los más adecuados para producir alimentos sanos y con menor uso de aditivos químicos, quienes no desaparecerán de las zonas rurales y juegan un papel estratégico en la seguridad alimentaria (Schneider, 2016).

Conforme a Ploeg (2013), indica que la agricultura familiar es de escala pequeña; se trata más de la forma en que las personas cultivan y viven; en sí es una forma de vida. Comenzando a reflexionar que los campesinos/productores, como actores sociales, son aquellas personas que realizan la actividad agrícola combinándola con otra actividad, es decir, son pluriactivos. No son objetos, sino sujetos, porque ellos mismos realizan sus acciones desde su interior, teniendo conciencia práctica y discursiva con un saber mutuo, y son capaces de explicar lo que hacen al utilizar la fuerza de trabajo de la familia para la producción y el consumo familiar de bienes y servicios; es decir, construyen el sistema agrolimentario. Perciben las transformaciones desde su paisaje y participan en las prácticas sociales, no como objetos (internos y externos), sino más bien como sujetos. Giddens (2006) hace referencia a los actores sociales en la conciencia práctica y discursiva, con un saber mutuo, para explicar lo que hacen, utilizándolos como parte importante de la construcción social, donde se busca recuperar la voz de participantes que crean y mantienen un conjunto de conocimientos.

Dada la complejidad en la definición de la agricultura familiar, se llegó a un acuerdo en América Latina y el Caribe (ALC). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) destaca que la agricultura familiar contribuye a “la importancia en la seguridad alimentaria, generación de empleo agrícola,

mitigación de la pobreza, conservación de la biodiversidad y tradiciones culturales” (FAO, 2014). La agricultura familiar puede definirse como una actividad agrícola con apoyo familiar que proporciona asistencia durante el proceso agrícola, sufragando el costo del cultivo; es una agricultura de subsistencia y tiene como base principal la seguridad alimentaria por proveer los alimentos básicos en un ciclo agrícola, una estrategia clave para evitar la pobreza y, sobre todo, mantener un ambiente sano. La primera elimina una incertidumbre ante la necesidad de los alimentos. Tiene como componentes básicos:

La disponibilidad de alimentos a nivel local o nacional tiene en cuenta la producción; la estabilidad a solventar las condiciones de inseguridad alimentaria y transitoria de carácter cíclico o estacional; el acceso y control sobre los medios de producción (tierra, agua, insumos, tecnología, conocimiento...) y a los alimentos disponibles en el mercado; consumo y utilización biológica de los alimentos. (FAO, 2011)

Con esto, la seguridad alimentaria constituye, en principio, un impulso casi instintivo de los grupos humanos para asegurar su sobrevivencia frente a la escasez (Torres et al., 2003). La seguridad alimentaria puede definirse como disponibilidad de alimentos básicos en la dieta, logrando estabilidad, asumiendo el acceso y control durante todo el tiempo que quieran utilizarlos y les alcance en un ciclo determinado. La agricultura familiar logra tener cohesión social y seguridad alimentaria al no provocar una escasez de alimentos, y también evita la pobreza. Según (CONEVAL, 2013), una persona se encuentra en situación de pobreza cuando presenta al menos una deficiencia social (en los indicadores de rezago educativo, acceso a servicios de salud, la seguridad social, calidad y espacio de la vivienda, servicios básicos en la vivienda y acceso a la alimentación) y si sus ingresos son insuficientes para adquirir los bienes y servicios necesarios para satisfacer sus necesidades alimentarias y no alimentarias. La pobreza se percibe principalmente como la falta

de alimentos, es decir, la ausencia de recursos alimentarios, como indica Torres (2016). La agricultura familiar es la actividad agrícola que genera seguridad alimentaria y evita la falta de alimentos. Por lo cual previene la pobreza. En efecto, esta agricultura se consolida como punto importante del sistema agroalimentario.

El sistema agroalimentario es todas las actividades realizadas con la producción, distribución de productos alimentarios y, en consecuencia, el cumplimiento de la función de la alimentación humana en una sociedad determinada (SADER, 2021). Esto indica que la mayoría de los agricultores/productores de la región sur de Tlaxcala se dedican principalmente a la producción del maíz para la subsistencia, lo que les permite mantener una identidad y un apego a este grano básico, una cuestión más cultural en la agricultura. La agricultura familiar ha sido un espacio de supervivencia para la población del sur de Tlaxcala. A través de ella, se ha enfatizado la convivencia cultural entre los pobladores y los espacios para la actividad agrícola. Sin embargo, estos espacios rurales están disminuyendo cada vez más debido al crecimiento urbano de la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala.

Asumiendo la verdadera voz en la investigación

La estrategia metodológica para abordar el objeto de estudio fue la investigación cualitativa y cuantitativa, es decir, una metodología mixta. Como enfoque principal, la investigación cualitativa es inductiva, con un enfoque fenomenológico para comprender la perspectiva de los actores sociales. Asimismo, busca abordar el tema de forma holística, considerando todos los elementos que rodean globalmente el fenómeno estudiado, sin reducir los sujetos a variables. Se trata de recuperar la voz individual de los sujetos que demuestran su comportamiento a través de historias y narrativas de vida. Esto implica no solo escucharlos, sino también asumir que su voz es la correcta o verdadera (Menéndez, 1997). Los participantes son agentes que crean significados a través de la narrativa, posicionándose como portadores de un

conjunto de conocimientos, experiencias y prácticas.

Se realizaron 41 entrevistas en profundidad a personas clave que realizan cultivos agrícolas combinándolos con otra actividad (pluriactividad) y dos grupos focales, uno de ejidatarios y otro de pequeños propietarios. A través del programa Nvivo 12 se realizó el análisis de frecuencia de palabras y una gráfica de la actividad agrícola. Se utilizó también el método cuantitativo, que permitirá conocer en profundidad los lugares de estudio, con datos recabados estadísticamente a partir de datos de las instituciones de gobierno sobre la producción del maíz.

Beneficios de la agricultura familiar en el sur de Tlaxcala ante la pandemia del COVID-19

La agricultura familiar es una actividad que se ha venido realizando en los municipios tlaxcaltecos a lo largo de su historia. Este proceso de cultivo se ha dado a través del aprendizaje generacional en el núcleo familiar y se realiza en pequeñas superficies. Tlaxcala es tradicionalmente agrícola y ha logrado mantener esta actividad a lo largo del tiempo. Los productores tienen un fuerte arraigo en la agricultura con apoyo familiar y su palabra clave es la agricultura, a través de la cual logran autoconsumo y les permite sobrevivir y percibirse a sí mismos como campesinos y agricultores. Es para muchos un medio de subsistencia, destinado a obtener alimentos para el consumo de la familia.



Figura 1. Frecuencia de palabras de los actores sociales sobre el impacto de la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala y la actividad agrícola con ayuda familiar. Fuente: Elaboración propia. Datos recopilados en trabajo de campo en cinco municipios del sur de Tlaxcala entre 2019 y 2020.

Las palabras representadas en la figura 1 son: agricultura, campesinos, auto-consumo y Tenancingo, planteadas por los actores sociales recabados en las entrevistas y grupos focales que tienen mayor relación con la agricultura familiar.

El principal cultivo es el maíz, que se cultiva en primavera y verano, ya que se trata de una agricultura de temporal. Durante mucho tiempo, los habitantes de Tlaxcala han subsistido de la actividad agrícola y, desde una perspectiva cultural, esta se enmarca en los rituales ancestrales que se realizan en Papalotla de Xicohténcatl, San Pablo del Monte y Tenancingo, en las laderas de la Malinche. El maíz tiene un significado cultural en ceremonias como la bendición el 2 de febrero, Día de la Candelaria: las mazorcas de maíz (especialmente las escogidas para semilla) se llevan a la iglesia en una pequeña canasta (conocida como chiquihuite) acompañadas de ramas de romero y flores blancas. Las celebraciones de los santos de las poblaciones están estrechamente vinculadas a los pedimentos de agua para la agricultura. El más celebrado es el Altepeihuitl, es la fiesta de pedimento del agua al dios del Cerro, en Papalotla de Xicohténcatl. Es una fiesta que los antepasados celebraban al iniciar el año, para pedir al Dios del Cerro y a la Malinche el agua que fecunda sus tierras durante el año.

Aquí los pequeños productores actúan sobre el espacio y buscan ofrecer e imponer un nuevo valor; es por ello que la agricultura va ligada a las tradiciones de fiestas patronales, procesiones y diversas costumbres que se han mantenido en las comunidades, teniendo como principal producción el maíz. Se trata de una identidad cultural tlaxcalteca, donde el maíz es el grano básico; el nombre "Tlaxcala" proviene del náhuatl Tlaxcallan, que significa "lugar de pan de maíz o de tortillas", por lo que no es de extrañar que sus pobladores se preocupen por

mantener el maíz.

El sistema agroalimentario de estos municipios de estudio es la producción del maíz, contando con apoyo de la familia, y comienza en los meses de marzo en los terrenos. Situados en la ladera de la Malinche, y en abril, en los terrenos que se encuentran en la parte más alejada del volcán, la mayoría es de temporada y pocos de riego. De esta forma nos damos cuenta de cómo la agricultura depende en parte de su geografía, ya que las mejores tierras de cultivo se encuentran en la parte baja. En tanto que las tierras situadas en la falda de la Malinche son menos productivas porque las barrancas permiten el desagüe, lo que arena las tierras de abajo y las hace más fértiles. La actividad agrícola, a cielo abierto, cuenta con el apoyo familiar, que se apoya con el trabajo de la yunta de animales (caballos y mulas).

Los municipios de estudio no se encuentran en grados de pobreza y menos de extrema, a excepción de las otras regiones, y han estado catalogados como la zona más rica de todo el estado de Tlaxcala, con mejor calidad de vida. De acuerdo con los datos del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL, 2017), 35 municipios redujeron la pobreza y pobreza extrema entre 2010 y 2015, entre ellos, los cinco municipios de estudio, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de pobreza y pobreza extrema en los municipios de estudio.

	2010	2015	2010	2015	2010	2015	2010	2015
Población total	119 000	119 000	119 000	119 000	119 000	119 000	119 000	119 000
Población en pobreza	11 900	11 900	11 900	11 900	11 900	11 900	11 900	11 900
Población en pobreza extrema	1 190	1 190	1 190	1 190	1 190	1 190	1 190	1 190
Índice de pobreza	10	10	10	10	10	10	10	10
Índice de pobreza extrema	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: CONEVAL. 2017, Medición de la pobreza, Tlaxcala, 2010-2015. Indicadores de pobreza por municipio.

El cultivo de los terrenos lleva todo un proceso: desde limpiarlos y hacerlos productivos; dependiendo del tipo de tierra, si es barrial o tepetate, se combina con arenilla y se abona para que resulte productiva. En su mayoría se utiliza el estiércol, deshecho de los animales que

se pudre en un hoyo durante meses y se reparte en los terrenos para enero, febrero o a más tardar en marzo, aunque algunos lo reparten cuando la milpa está creciendo. El ciclo de la siembra del maíz se comienza preparando los terrenos con el barbecho para aflojar la tierra; dependiendo de dónde se ubiquen los terrenos, se siembran en marzo para los que se encuentren en las faldas de la Malinche, conocida también como monte, y en abril para el resto de los terrenos.

A los quince días de haber sembrado, se lleva a cabo la resiembra, proceso en el cual se vuelve a sembrar semilla donde “no pasó”. Después sigue la labrada: en esta etapa las milpas ya están grandes, como de una altura promedio de 20 cm, y necesitan más tierra para crecer; por lo que el arado (tanto del tractor como de la yunta) pasa en medio del surco, donde se necesita que, al mismo tiempo, se destapen las plantas porque el arado las va tapando. Después de labrar, sigue la segunda; la mayoría de las personas agregan abono químico (urea); antes solo se usaba el de los animales; hoy se utilizan los dos. Además, se tiene que hacer entre una milpa y otra una especie de montaña y se hacen reparos en los surcos; son pequeñas montañas de tierra en medio de ellos, por lo regular son cuatro y sirven para evitar que el agua se lleve la tierra cuando llueve y, al mismo tiempo, permiten que el agua se encharque en los reparos para que filtre y mantenga así la humedad. Después viene la hierba; entre los meses de junio y julio, la mayoría de la gente fumiga y pocos lo hacen con hoces para eliminar las hierbas no deseadas. A principios de julio empieza el elote, siempre y cuando llueva. Los primeros quince días del mes de agosto son el momento en que se cosecha el elote tierno.

Una vez que se seca la milpa, continúa la etapa de cosecha; esto se lleva a cabo a finales de octubre y principios de noviembre. En esta época se utiliza más la mano de obra familiar, por lo cual podemos ver que es por temporada, en donde se combina esta actividad agrícola con otra. Muchos pizcan el maíz en los terrenos de cultivo; algunos más acarrean el zacate y lo colocan en la parte trasera de su casa y ahí pizcan. Después de la piza, el maíz se tiende a secar y pasar

a desgranar; algunos lo hacen con el uso de la piedra y muy pocos usan la máquina desgranadora. Teniendo el maíz desgranado, se almacena con pastilla para maíz para que dure para otro ciclo agrícola.

El maíz forma parte de los granos básicos de la sociedad tlaxcalteca; se distribuye principalmente para la alimentación en tortillas y tamales para la población del sur de Tlaxcala. El aporte de nutrición del maíz está dado por sus proteínas, vitaminas y minerales; contiene tiamina (vitamina B₁), riboflavina (vitamina B₂) y niacina (vitamina B₃). Con la nixtamalización, su valor nutricional aumenta entre 39 y 56% de niacina, de 32 a 62% de tiamina y de 19 a 36% de riboflavina del requerimiento diario mínimo para el ser humano (Paredes et al., 2008). La tortilla contiene calcio, fósforo, hierro, carbohidratos y fibra, que aportan calorías. El maíz es una planta eficiente; las hojas se utilizan para envolver tamales y otros alimentos frescos, y para hacer figuras artesanales; las mazorcas se utilizan para hacer atoles y tamales; los elotes y esquites se utilizan para hacer sopas, pasteles, chilatole, topos, tostadas, pinole, pozole, huitlacoche. Los olotes sirven como combustible y para hacer tapones; los cabellos del elote, para remedios caseros. Las cañas tiernas contienen azúcar y las secas, forrajes. En sí mismos, son un importante recurso ambiental.

El maíz se considera un cultivo estratégico para la soberanía alimentaria de nuestro país. En Tlaxcala, el maíz es un grano básico para la población y una cuestión cultural e identitaria: es parte de nuestra raíz. En la figura 2 se muestra el ascenso en la producción del maíz de 2019 a 2020.

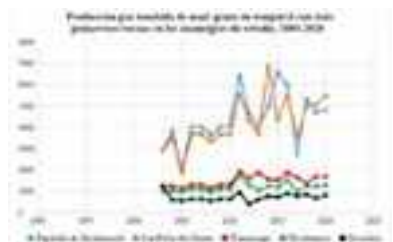


Figura 2. Producción por toneladas de maíz grano de temporal con ciclo primavera-verano en los cinco municipios del sur de Tlaxcala, 2003-2019.

Fuente: SAGARPA, SIAP, 2020

Como se puede observar, la producción del maíz en 2020 no disminuyó, sino que generó mayor producción a diferencia de 2019. Esto demuestra que la agricultura familiar sigue formando parte de la vida cotidiana de las poblaciones tlaxcaltecas, y que, a pesar de la pandemia de COVID-19, no ha perdido su presencia. Los pequeños productores tomaron en cuenta esta enfermedad; si bien se realizó una suspensión inmediata de actividades no esenciales, la agricultura se mantuvo. Por lo cual, la mayoría optó por salir al campo y sintió que fue más conveniente porque hubo una sana distancia, donde las personas más ancianas pudieron caminar sin problema. Otra opción que notaron es que tienen suficiente para comer: algunos quelites, flor de calabaza, chayotes, elotes, huevos de gallinas, conejo, por lo que fueron sintiendo que es más sano estar en el campo que en la ciudad. El maíz mantiene un papel especial en el sur de Tlaxcala; va desde lo local, estatal y nacional. La primera con la manutención de la actividad agrícola, teniendo la mayor producción del maíz, celebración cultural y modo de vida. Y la segunda, en 2011, se dio la Ley de Fomento y Protección al Maíz como Patrimonio Originario del Estado de Tlaxcala y nueve años después un paso a nivel federal con la Ley Federal para el Fomento y Protección del Maíz Nativo.

Algunos productores indicaron que esta pandemia ha estado cambiando todo, es decir, movió dos zonas: la ciudad de manera negativa y el campo de manera más positiva. Una de nuestras informantes expresa: "Como dice mi yerno, pues aquí estamos bien, a diferencia de la ciudad, ya tenemos para comer. Por ejemplo, los de la ciudad no tienen que comprar y están sin trabajo; es más difícil. "Nosotros aquí hacemos una salsita, con sal, y tenemos tortillas y es lo principal; ya comemos y a veces mucha gente no lo ve así". (Coyotl, 2020). Todo esto da a entender que existe una diferencia marcada entre el campo y la ciudad, las condiciones que otorgan cada zona. Los pequeños propietarios en el grupo focal indicaron que "esta pandemia provoca mucha hambre en la ciudad; nosotros, como sea, tenemos y estamos

acostumbrados a comer sin problema". (I. Buensuceso, comunicación personal, 2020). Es decir, también cambió modos de vida y más en la ciudad.

Fueron notando cosas positivas con relación al campo, como uno de nuestros informantes expresa: "Por la pandemia, muchos se dedicaron a limpiar los terrenos, pero tiempo atrás quedaban abandonados". "Todos nos liberaron para estar más tiempo presente en el campo; muchas tierras de cultivo se habían abandonado" (Muñoz, 2020). Desde esta perspectiva, la agricultura familiar, al mantenerse, no fue perdiendo su estrategia, sino todo lo contrario, fortaleció la mano de obra familiar, por lo cual esta actividad agrícola benefició la alimentación de estos municipios dada la pandemia de coronavirus.

En las entrevistas en profundidad y en los dos grupos focales se muestra que existe un fuerte valor hacia la tierra y que es necesario conservarla, como se presenta en la figura 3. El primer nodo es "¿Cultiva la tierra?", luego "¿Qué se siembra?", y así sucesivamente con esto: abandono y venta de tierras, apoyo del Estado, campesinos, ciudad de Puebla, ganadería, industria, migración, modos de vida, pluriactividad, población, teniendo como resultado moderadamente positivo el valor que se le da a las tierras y su conservación, y finalizando con la vivienda. De esta manera, la percepción de los actores sociales, dada la situación del impacto urbano y la pandemia, muestra un gran valor a la tierra; por lo tanto, indicaron que es necesario conservarla.

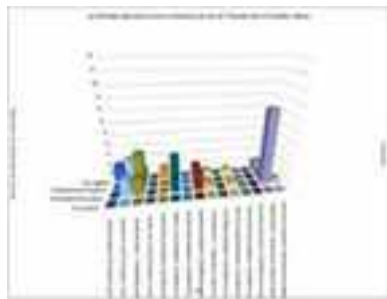


Figura 3. La actividad agrícola en cinco municipios del sur de Tlaxcala, ante el impacto urbano de la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala. Fuente:

Elaboración propia. Datos recopilados en trabajo de campo en cinco municipios del sur de Tlaxcala entre 2019 y 2020

Otra de nuestras informantes mencionó que, si bien “hay gente que el campo no le llamaba la atención y que lo abandonan”, con la pandemia, si tienes un terrenito, pues vamos al campo, a sacar lo de la pandemia, a valorar el campo. También hay personas que no quieren sembrar, pero ahora la gente lo está trabajando, que es muy saludable el campo” (Zambrano, 2020). Asimismo, señaló otra señora: “La gente que no iba al campo con esta pandemia sí fue al campo”. Seguir adelante ante esta pandemia, gracias a Dios” (Albina, 2020). Esto muestra que la actividad agrícola tiene un valor no económico, sino más social, cultural y ambiental, y muchas características positivas que van sacando del campo; es decir, darle otra perspectiva más positiva, y no como siempre había estado catalogada de manera negativa.

Conclusión

La agricultura familiar en Tlaxcala ha estado presente a través del tiempo; la unidad familiar ha sido el punto central de mantener esta actividad. Ha estado transmitida de generación en generación con aspectos sociales, culturales y ambientales. La llegada de las políticas neoliberales a finales del siglo pasado condujo a la marginación de la agricultura campesina y, en mayor medida, a los ejidos de los tres municipios de estudio. Por lo cual, es momento de estar valorando el campo, es decir, reconocer el papel especial que tiene en la sociedad con la producción de la alimentación básica que es el maíz. Si bien la agricultura campesina y familiar se contextualiza de la misma forma al tener un núcleo familiar, mano de obra de la familia y producción de pequeña escala, básicamente no ha estado capitalizada, sino que tiene más aspectos sociales, culturales y ambientales; se sugiere darle la vuelta a la mirada en la que han estado comprendiendo.

La agricultura familiar conserva su valor cultural entre los habitantes del sur del estado de Tlaxcala. Dado el crecimiento

de la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala y de la pandemia, representa la continuidad de usos y costumbres; esto les permite prolongar la tradición y conservar la agricultura. La mayoría de los pequeños productores indicaron que la pandemia motivó a que mucha gente saliera al campo y estas tierras dejaran de ser abandonadas, es decir, fortaleció el sistema agroalimentario de esta población. Lo cual nos lleva a responder a la pregunta central: ¿Cuáles fueron las características principales para cultivar el maíz en el sur de Tlaxcala ante la pandemia de COVID-19? Una de las características principales de cultivar maíz es la costumbre en los municipios de estudio, su modo de vida, el ingreso de alimentos saludables, el apoyo familiar y el valorar esta actividad agrícola de manera positiva. De esta manera, la agricultura está adquiriendo mayor atención, es decir, retoma su papel principal en las poblaciones del sur de Tlaxcala ante la pandemia, que fue perdiendo prioridad por la urbanización.

La actividad agrícola que se realiza en el sur de Tlaxcala cuenta con apoyo familiar; su producción posibilita el autoconsumo, lo que a su vez genera seguridad alimentaria y previene la pobreza, una identidad arraigada en el cultivo del maíz. Esto permite indicar que el tipo de actividad agrícola que se realiza en el sur de Tlaxcala es la agricultura familiar de subsistencia. Los beneficios de la agricultura familiar ante esta pandemia están ligados principalmente a la seguridad alimentaria, ver al campo muy saludable para el ser humano, rescatar las tradiciones culturales, la conservación de la biodiversidad, el uso sostenible de los recursos naturales, como la tierra y el agua, el ambiente y la cultura, para posibilitar alimentos sostenibles. Esta pandemia revaloró a la agricultura familiar en el sur de Tlaxcala como un fortalecimiento fuerte al sistema agroalimentario, fue adquiriendo mayor valoración, no solo en un sentido económico, sino más social, cultural, ambiental y familiar.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RDE-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

La autora de este artículo declara no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada en el Doctorado en Ciencias del Desarrollo Rural Regional en la Universidad Autónoma Chapingo.

Referencias

Chiriboga, M. (2010). El rol de la agricultura familiar en el desarrollo y la seguridad alimentaria (Entrevista a Manuel Chiriboga, Investigador de RIMISP); Revista IICA, núm.5, Oficina IICA-Uruguay, pp. 28, 29.

CONEVAL (2013), "Informe de pobreza y evaluación. Estado de México, 2012-2013". México, DF.

- CONEVAL (2017), Medición de la pobreza, Tlaxcala, 2010-2015. Indicadores de pobreza por municipio. Tlaxcala: Gobierno del estado de Tlaxcala

FAO. (2014). Agricultura Familiar en América Latina y el Caribe: Recomendaciones de Política. (S. y G. L. Salcedo, Ed.) Santiago, Chile.

FAO. (2011). Seguridad Alimentaria y Nutricional Conceptos Básicos. Programa Especial para la Seguridad Alimentaria - PESA - Centroamérica - Proyecto Food Facility Honduras. Honduras.

Giddens, Anthony. (1995). La constitución de la sociedad: bases para la teoría de la estructuración. Buenos Aires, Amorrortu Editores.

Menéndez, Eduardo L. (1997). El punto de vista del actor: homogeneidad, diferencia e historicidad. En CIESAS. Relaciones de Estudios de Historia y Sociedad. México: El Colegio de Michoacán.

Paredes López, Octavio; Guevara Lara, Fidel; Bello Pérez, Luis Arturo. (2008). "La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz". CIENCIAS 92-93.

Ploeg, Jan Douwe van der, (2013), "Ten qualities of family farming", Theme Overview, Family Farming. ILEIA. FAO.

SADER, 2021, Sistema agroalimentario de México, un desafío de bienestar, en línea https://www.gob.mx/agricultura/articulos/sistema-agroalimentario-de-mexico-un-desafio-de-bienestar_Gobierno_gob.mx. Consultado el 13 de octubre de 2021.

Schneider, S, (2016). Family farming in Latin America and the Caribbean: looking for new paths of rural development and food security, Food and Agriculture Organization of the United Nations and the United Nations Development Programme, Brazil.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). Información estadística de cierre del año agrícola, SAGARPA. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>

Torres, F. (Comp.). (2003), Seguridad alimentaria: seguridad nacional, IIE-UNAM, México. www.clacso.edu.ar

Torres, F. D. V. M. del C. T. J. M. M. E. (Coord.). (2016). Reflexiones sobre seguridad alimentaria: búsqueda y alternativas para el desarrollo en México.

Entrevistas

E. Muñoz, comunicación personal, 4 de octubre de 2020

G. Albina, comunicación personal, 29 de octubre de 2020

L. Zambrano, comunicación personal, 15 de octubre de 2020

R. Coyotl, comunicación personal, 26 de octubre de 2020

I. Buensuceso, comunicación personal, 29 de octubre de 2020

LOS ANTIMICROBIANOS COMO ARMAMENTO CONTRA ENFERMEDADES INFECCIOSAS: ESTRUCTURA

ANTIMICROBIALS AS WEAPONS
AGAINST INFECTIOUS DISEASES: STRUCTURE

Roberto Vélez García,
Leticia Romero Mantilla,
Margarita María de la Paz Hernández Arenas*

Licenciatura en Biomedicina
Eje de Microbiología
Facultad de Medicina
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

roberto.velezgarcia@viep.com.mx
leticia.romeroma@alumno.buap.mx
margarita.arenas@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0009-0005-7658-4916>
<https://orcid.org/0009-0005-5042-4324>
<https://orcid.org/0000-0002-1483-0510>

Resumen

Los antimicrobianos son medicamentos que desde su introducción a la clínica han permitido extender la esperanza de vida, ya que combaten las enfermedades infecciosas y minimizan su aparición durante procesos quirúrgicos. La interacción entre el antimicrobiano y los componentes del microorganismo se debe a la química y estructura de la molécula, permitiendo así la interferencia o modificación de los procesos vitales de los microorganismos. A lo largo de los años un número importante de antimicrobianos han sido introducidos a la práctica clínica debido a la creciente resistencia que adquieren o desarrollan los patógenos por el uso inapropiado de estos compuestos por parte del personal de salud y consumidores. Este proceso se ha llevado a cabo mediante el descubrimiento de nuevos compuestos naturales, sintéticos y semisintéticos, a través de la modificación de los radicales del núcleo farmacóforo (semi sintéticos), permitiendo así mejorar sus características farmacológicas y elevar la población microbiana susceptible. Con base en lo anterior, esta revisión expone la estructura química y los principales grupos de antimicrobianos que actualmente se emplean, con el fin de proporcionarle al lector una guía concisa y de fácil acceso a las características generales de los fármacos, dándole así, un panorama general que le permita entender situaciones que involucren su uso.

Palabras clave: Antibacteriano; Antimicrobiano; Estructura química; Espectro de actividad.

Abstract

Antimicrobials are medications that, since their introduction to the clinic, have allowed for an extension of life expectancy, as they combat infectious diseases and minimize their occurrence during surgical procedures. The chemistry and structure of the molecule allow the antimicrobial to interfere with or modify the vital processes of the microorganism. Over the years, many new antimicrobials have been used in medicine because microorganisms are becoming resistant due to the wrong use of these drugs by doctors and patients. This has been done by finding new natural, synthetic, and semisynthetic compounds that change parts of the main structure (semisynthetic), which helps improve how these drugs work and increases the number of germs they can affect. Based on the above, this review presents the chemical structure and the main groups of antimicrobials currently in use to provide the reader with a concise and easily accessible guide to the general characteristics of the drugs, thus giving them an overview that allows them to understand situations involving their use.

Keywords: Antibacterial; Antimicrobial; Chemical structure; Spectrum of activity.

Introducción

A principios del siglo XX los antibacterianos (fármaco que destruye o inhibe el crecimiento de bacterias) se introdujeron en la clínica, proporcionando a la comunidad médica una herramienta valiosa para combatir las enfermedades infecciosas. Su introducción permitió salvar innumerables vidas, extender la esperanza de vida y realizar procedimientos médicos que antes eran mortales, como las cirugías (Etebu & Arikepar, 2016).

Los antibacterianos se clasifican en función de diferentes criterios: origen (naturales, sintéticos y semisintéticos), estructura química (familias), forma de actuar (bacteriostático o bactericida), el espectro de acción (amplio, mediano o estrecho) y por su mecanismo de acción. En donde, los naturales pueden ser producidos por bacterias, hongos y mayoritariamente por actinomicetos (Etebu & Arikepar, 2016)

Los antibacterianos deben cumplir con las características de un “antibiótico ideal”, como son: especificidad por su blanco bacteriano sin alterar procesos en las células del individuo, amplio espectro de actividad, bactericida, baja toxicidad, adecuada farmacocinética (absorción, distribución, metabolismo y eliminación), carente de unión a proteínas plasmáticas, administración accesible (oral o parenteral) y económico. Respecto a la farmacocinética una semivida plasmática larga para reducir la dosis diaria, buena distribución tisular que incluya el líquido cefalorraquídeo, escasa unión a proteínas y que no tenga interferencia con otros fármacos (Aithal P & Aithal, 2018).

Con base en la estructura química encontramos 18 familias de antibacterianos: betalactámicos, sulfonamidas, trimetoprim, aminoglucósidos, polipéptidos, tetraciclinas, fenicoles, macrólidos, nitrocompuestos, glucopéptidos, estreptograminas, rifampicina, cicloserina, lincosamidas, cetólidos, quinolonas, fosfomicina y oxazolidinonas (Hutchings et al., 2019)

Clasificación por estructura química

Beta-lactámicos

Son bactericidas parciales debido a que solo actúan durante la fase de crecimiento celular, su eficiencia depende del tiempo, ya que su efecto máximo es cuando la concentración libre es de 4 a 5 veces mayor que la concentración mínima inhibitoria (CMI), se administra en intervalos cortos y bien definidos (Marín & Gudíol, 2003).

El núcleo básico es un anillo betalactámico, anillo heterocíclico conformado por tres átomos de carbono y uno de nitrógeno, responsable del mecanismo de acción y la baja toxicidad directa en las células eucariotas, carentes de pared celular, sitio de acción de esta familia, no obstante, en su mayoría están unidos a un anillo secundario, así mismo a uno o varios radicales, responsables de modificar las propiedades del compuesto. El anillo secundario diferencia a los distintos tipos de betalactámicos (Gómez et al., 2015; Suárez & Gudíol, 2009).

Penicilinas: Compuestas por un anillo betalactámico y un anillo de tiazolidina, formando el ácido 6-aminopenicilánico, producto obtenido a partir de la condensación de una molécula de valina y de cisteína. Posee un radical en la posición 6 del anillo betalactámico que varía de unas a otras modificando sus propiedades (Figura 1).



Figura 1. Descubrimiento e introducción a la clínica de los antibióticos

La penicilina G (bencilpenicilina) fue el primer β -lactámico utilizado clínicamente, se identificó en 1928 en *Penicillium notatum* (Marín & Gudiol, 2003).

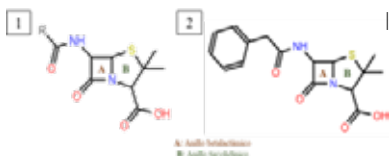


Figura 1. 1) Núcleo betalactámico de las penicilinas; 2) Estructura de la penicilina G. Suárez & Gudiol, 2009. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013)

Cefalosporinas: Poseen un núcleo cefem, conformado por un anillo betalactámico y un anillo dihidrotiazínico. La modificación en los radicales de las posiciones 3 y 7 modifican la conformación espacial de cada cefalosporina y define las interacciones que puede establecer con las proteínas de unión a penicilina (PBP) (Marín & Gudiol, 2003). Actualmente se agrupan en 5 generaciones. El paso de generación se vincula con un incremento de su espectro y de su actividad intrínseca contra Gram-negativos, así como una progresiva reducción de la actividad frente a Gram-positivos. Durante la década de 1950, se descubrió la cefalosporina C en *Cephalosporium acremonium*, primera fuente productora de las cefalosporinas (Gómez et al., 2015).

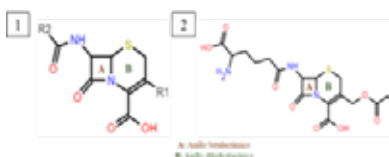


Figura 2. 1) Núcleo betalactámico de las cefalosporinas; 2) Estructura de la cefalosporina C. Suárez & Gudiol, 2009. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Carbapenémicos: Consiste en la fusión de un anillo betalactámico y uno pirrolidínico compartiendo un nitrógeno. La naturaleza y la posición espacial de las cadenas laterales intervienen en la afinidad por las PBP, el espectro y la resistencia a las betalactamasas. Son los betalactámicos de mayor espectro y actividad. La tienamicina se identificó a mediados de la década de

1970 en *Streptomyces cattleya*, como un potente antibiótico de amplio espectro con la típica estructura β -lactama de cuatro miembros fusionada a un nuevo anillo de cinco miembros en el que el carbono, en lugar del azufre, estaba presente en la posición 1 (Marín & Gudiol, 2003).

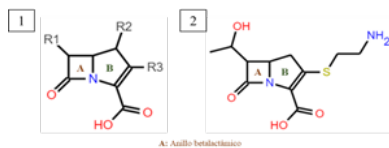


Figura 3. 1) Núcleo betalactámico de los carbapenémicos; 2) Estructura de la tienamicina Suárez & Gudiol, 2009. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Monobactámicos: Deriva del ácido 3-amino monobactámico (3-AMA). Poseen una estructura sencilla monocíclica en la que el anillo betalactámico no está fusionado a otro secundario. El aztreonam, un β -lactama monocíclica con un sustituyente ácido N1-sulfónico, se originó como derivado de un nuevo antibiótico (Marín & Gudiol, 2003).

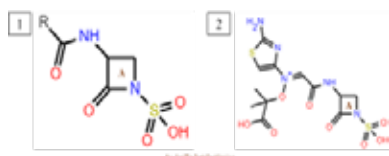


Figura 4. 1) Núcleo betalactámico de los monobactámicos; 2) Estructura del aztreonam Suárez & Gudiol, 2009. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

La modificación de los radicales permite modificar las características del antibacteriano, tales como el espectro, la afinidad por determinados receptores o la resistencia a las betalactamasas (Suárez & Gudiol, 2009).

Antifolatos

Los inhibidores de la biosíntesis del folato han sido antibacterianos de éxito desde la década de los 40's, cuando las sulfonamidas se aplicaron por primera vez de forma tópica. Uno de los primeros agentes antibacterianos sistémicos de

uso generalizado fue el Prontosil. Este es un pro-fármaco que al metabolizarse genera la sulfanilamida, la cual inhibe a la dihidropteroato sintasa (DHPS) bacteriana por competencia. En esa misma década, se encontró que las 2,4-diaminopirimidinas sustituidas (precursores del trimetoprim, TMP), interfieren en el metabolismo del folato. El uso de sulfamidas o TMP provoca "muerte sin timina" en la célula bacteriana (Estrada et al., 2016)

Sulfamidas: Primeras moléculas sintéticas empleadas eficazmente en el tratamiento de infecciones humanas. Son derivados de la sulfanilamida y poseen acción bacteriostática. Su estructura es similar al ácido para-aminobenzoico (PABA), su grupo farmacóforo es el grupo sulfonamida (Fig. 5.1, círculo verde) unido a un anillo aromático (Figura 5.2, anillo B), el cual tiene una sustitución en posición 4 por un grupo amina. Este grupo amino libre es fundamental para la actividad antibacteriana y cuando se acetila se pierde la actividad. Si se sustituye el grupo sulfonilo de la posición 1, se generan compuestos con propiedades farmacológicas y antibacterianas variadas (Pérez Alba, 2016; Vicente & Pérez-Trallero, 2010).

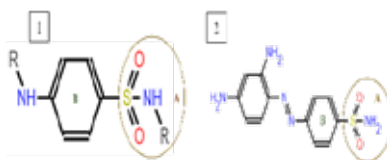


Figura 5. 1) Núcleo farmacóforo de las sulfamidas; 2) Estructura del Prontosil. R: radical, heterociclo o un grupo polar. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Trimetoprim: Es un antimicrobiano sintético utilizado clínicamente en la década de los 60's. Estructuralmente es una 2,4-diamino-5-(3',4',5'-trimetoxibencil)-pirimidina, pertenece al grupo de las diaminopirimidinas (Wróbel et al., 2019).

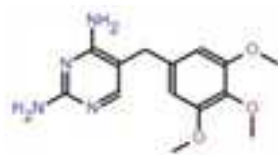


Figura 6. Estructura del trimetoprim. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013)

Aminoglucósidos

Antibacterianos de origen natural (producidos por actinomicetos) o semisintéticos que se introdujeron para uso clínico de rutina, sin embargo, con la llegada de las cefalosporinas, carbapenémicos y fluoroquinolonas fueron reemplazados y usados en combinación sinérgica con las cefalosporinas de tercera generación (cefotaxima, ceftriaxona, ceftizoxima, ceftazidima, cefoperazona y moxalactama) útiles contra *Serratia*, *Citrobacter*, *Providencia* y *Proteus* indol-positivas (Krause et al., 2023).

Estos antibióticos junto con la espectinomicina forman parte de los aminociclitolos, alcoholes cíclicos aminados, caracterizados por una estructura central de aminoazúcares conectados mediante enlaces glucosídicos a un aminociclitol dibásico que suele ser una hexosa de estreptidina o desoxiestreptamina; la estructura central es importante, pues tiene una influencia directa en los mecanismos de acción y resistencia (Krause et al., 2023) (Figura 7).

Existen cuatro grupos estructurales para el centro de la molécula y confieren la actividad bactericida: 1 grupo con anillo de estreptidina y 3 con la estructura desoxiestreptamina (Tabla 1) (Serio et al., 2018).



Figura 7. 1) Estructura química de los aminoglucósidos; 2) Estructura de la neomicina. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013)

Polimixinas

Son compuestos lipopéptidos cíclicos, en donde, solo las polimixinas B y E (colistina), que tienen una estructura similar, se han utilizado en el ámbito clínico. La polimixina B se describió en 1947, mientras que la polimixina E se identificó en 1949, se aisló como metabolito secundario de un matraz en fermentación de *Paenibacillus polymyxa* variante colistin. Son producidas por sistemas de sintetasa peptídica no ribosomal (Ledger et al., 2022). Estructuralmente están formados por 10 aminoácidos, dispuestos como un heptapéptido circular unido a un tripéptido exocíclico, que a su vez está unido a un residuo de ácido graso. En la posición 6 del núcleo la colistina tiene un grupo D-leucina, mientras que la polimixina B tiene un isómero D-fenilalanina. Los demás aminoácidos son una variedad de residuos D-leucina y L-treonina, así como cinco residuos conservados de ácido L- α - ω -diaminobutírico (DAB) en las posiciones 1, 3, 5, 8 y 9 de las moléculas antibióticas, esenciales para conferir al anillo heptapeptídico en el extremo C de los una carga neta positiva a pH fisiológico, y la naturaleza catiónica e hidrofílica esencial para las propiedades antimicrobianas de la colistina, al igual que la cola lipídica (Kelesidis & Falagas, 2015).



Figura 9. 1) Estructura química general de las polimixinas; 2) Estructura de la polimixina B 2 (Ledger, et al., 2022). Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Tetraciclinas

Familia de origen natural descubierta en 1940 a partir de *Streptomyces* spp.; en 1980 surgen los semisintéticos para hacer frente a los problemas de resistencia antibiótica. Son agentes bacteriostáticos de amplio espectro, usados en el tratamiento de infecciones respiratorias, urogenitales y gastrointestinales (Grossman, 2016).

Poseen un núcleo de estructura tetracíclica lineal compuesta de 4 anillos fusionados, denominado núcleo de hidronaftaceno (6-desoxi-6-metil tetraciclina) unido a grupos funcionales, los anillos son designados de izquierda a derecha como A, B, C y D, a los cuales se anclan una variedad de grupos funcionales (Figura 10). En conjunto forman complejos quelantes con diferentes cationes (calcio, magnesio o hierro) lo que explica la insolubilidad en agua y dificultad de absorción (Bastos et al., 2012).

Su actividad antibacteriana se debe a la estructura tetracíclica fusionada de forma lineal, tiene 6 miembros de carbono por anillos, los sitios de quelación pertenecen a lo que se denomina sistema de β -dicetona (posiciones 11 y 12), a los grupos enol de la molécula (posiciones 1 y 3) y grupos carboxamida (posición 2) del anillo A. Las sustituciones en las posiciones 1, 3, 4a, 10, 11 y 12 son contraproducentes pues afecta negativamente la actividad antibacteriana; cambios en 2 y 3 disminuyen la actividad, los radicales que se añadan pueden aumentar los efectos farmacocinéticos pero no modifica el espectro de actividad. En medio básico, el grupo 6-hidroxilo ataca al ácido carboxílico (COOH) de la posición 11 provocando la apertura del anillo B (Fig. 10) y por lo tanto la inactivación del antibiótico (Chopra & Roberts, 2001).

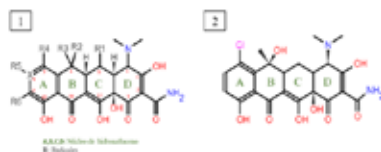


Figura 10. 1) Núcleo farmacóforo de las tetraciclinas. 2) Estructura de la clortetraciclina. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013)

Tabla 2. Grupos radicales

	R1	R2	R3	R4	R5
Tetraciclina	H	H	CH3	OH	H
Clortetraciclina	H	H	CH3	OH	Cl
Oxitetraciclina	H	OH	CH3	OH	H
Doxiciclina	H	OH	CH3	OH	H
Minociclina	H	H	H	H	N(CH3)

Modificado de Microbiología Médica. 1999. Mims, Playford, Rolt, Wakelyn y Williams. Ed Harcourt Brace. Chopra and Roberts. 2001. Microb. Mol.Rev.2001. 65(2):232-260.

Fenicoles

Fármacos descubiertos hace más de 60 años atrás, su representante es el cloranfenicol, agente bacteriostático de amplio espectro identificado en 1947 a partir de Streptomyces venezuelae. A pesar de su toxicidad hematológica y la resistencia que ha adquirido, son medicamentos de primera línea en infecciones meningocócicas y fiebre tifoidea en países en vías de desarrollo (Epaulard & Brion, 2010).

El cloranfenicol (Cm) es una molécula altamente liposoluble, isómero D-treo de una molécula pequeña, que consiste en un anillo de p-nitrobenceno conectado a una cola de dicloroacetilo (Fig. 11 círculo verde) a través de 2-amino-1,3-propanodiol (Fig. 18 círculo morado), este último es el responsable de la actividad antibacteriana. La posible modificación en la molécula de Cm que es negativa para su efectividad es el cambio del grupo nitro por un grupo metil-sulfonil (CH3-SO2) (Dinos et al., 2016).



Figura 11. Estructura química del cloranfenicol. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Macrólidos

El primer antibacteriano de este grupo fue la eritromicina obtenida en 1952 a partir de la bacteria Saccharopolyspora erythraea,

(actualmente Streptomyces erythraeus), útil en pacientes alérgicos o resistentes a penicilinas; fueron aprobados para tratar infecciones como neumonía, sinusitis, faringitis, amigdalitis, infecciones cutáneas no complicadas y otitis media en pacientes pediátricos (Patel & Hashmi, 2023).

Poseen un anillo de macrolactona de 14 a 16 átomos de carbono con sustituciones de grupos polares y no polares, además se asocian con desoxiazúcares por enlaces glucosídicos, uno de ellos es neutral (cladinosa) y el otro aminado (desosamina), las estructuras más pequeñas, 14 a 15 carbonos, se asocian con los macrólidos de uso clínico en humanos (Jednacak et al., 2020). Los radicales que posee (R1 y R2) dependen del tipo de macrólido, puede ser un grupo metoxi (claritromicina), radical etiloxima (roxitromicina), radical metilo (azitromicina) (Cobos-Trigueros et al., 2009).

Sus macrociclos son estructuralmente más grandes, dando alta organización estructural, ocupando un espacio significativo y formando asociaciones de proteína y ligando dentro de sitios de unión no fácilmente accesibles (Zin et al., 2018).



Figura 12. 1) Estructura química de los macrólidos; 2) Estructura de la eritromicina. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Nitrocompuestos

La presencia de grupos nitro en los fármacos a menudo se considera “indeseable”, sin embargo, después del descubrimiento del cloranfenicol, los ciclos y heterociclos que contienen un grupo nitro (NO_2) han sido estudiados por sus actividades antimicrobianas, antineoplásicas, antihiper-tensivas, antiparasitarias, tranquilizantes y herbicidas.

El NO_2 tiene una carga positiva que le permite atraer electrones, la resonancia que experimenta el grupo nitro con los anillos aromáticos genera cambios en su polaridad, así como la desactivación de determinadas posiciones, favoreciendo la interacción con sitios nucleófilos de enzimas, generando su inhibición. Los nitroimidazoles y los nitrofuranos son antimicrobianos de origen sintético que poseen cierta semejanza estructural pertenecen a esta familia (Noriega et al., 2022).

Nitrofuranos: Profármacos bacteriostáticos o bactericidas que resultan de la nitración de compuestos heterocíclicos en la década de 1940, el más conocido es la nitrofurantoina aprobada por la FDA en 1953 para el tratamiento de infecciones de tracto urinario, y que ha tenido un resurgimiento después de su desuso en 1970, dada la aparición de resistencia hacia otros antimicrobianos como trimetropin/sulfametoxazol y fluoroquinolonas (Huttner et al., 2015).

El componente estructural es un furano (Fig. 17 anillo B), es un anillo aromático de 5 miembros con 4 átomos de carbono y 1 de oxígeno conectado a un grupo nitro ($-\text{NO}_2$) (Figura 13, círculo morado). Debido a la exigencia clínica se han hecho modificaciones de las cadenas laterales de los nitrofuranos, específicamente del anillo de imidazolidinona, correspondiente a la posición del radical 2 (Wijma et al., 2018).

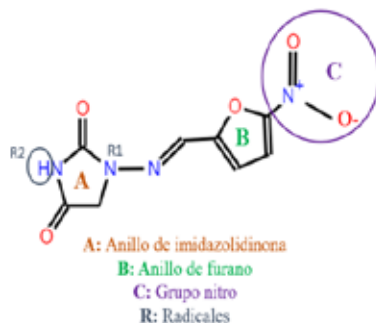
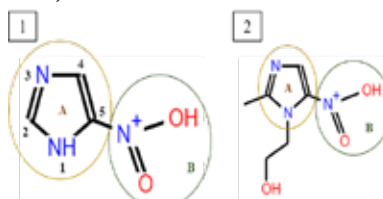


Figura 13. Estructura química de la nitrofurantoina. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Nitroimidazoles: En 1955 a partir de *Streptomyces* spp., se obtuvo la azomicina, un nitroimidazol (2-nitro-1H-imidazol) con actividad contra *Trichomonas vaginalis*. Tras la falla en su síntesis, los laboratorios se enfocaron en la actividad de los 5-nitroimidazoles isoméricos, moléculas más accesibles con propiedades antiprotazoarias más efectivas que el producto natural. Uno de los primeros compuestos sintetizados con el mejor equilibrio entre actividad y toxicidad fue el metronidazol, 1-(2-hidroxietil)-2-metil-5-nitroimidazol. A partir de ahí y sobre todo entre los años 1970 y 1975 se empezaron a sintetizar una amplia variedad de nitrocompuestos (López Nigro & Carballo, 2008).

En la familia encontramos 2 grupos: los 2-nitroimidazoles y los 5-nitroimidazoles, estos último con actividad antimicrobiana. Los 5-nitroimidazoles están compuestos por un anillo imidazólico; en la posición 5 poseen un grupo nitro, y su diferencia está en los distintos sustituyentes en la posición N1 y C2, confiriéndole propiedades particulares que finalmente modifican su farmacocinética (López Nigro & Carballo, 2008).



A: Anillo imidazólico

Figura 14. 1) Estructura química del 5-nitroimidazol. 2) Estructura química del metroimidazol. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Glucopeptidos

Son un grupo de péptidos no ribosomales cíclicos o policíclicos glicosilados. Su núcleo está conformado por un heptapéptido unido a diferentes azúcares y residuos de aminoácidos. Actúan como agentes fijadores de sustratos, precursores de la pared celular. Los miembros más característicos de esta familia son la vancomicina y el lipoglicopéptido teicoplanina, junto con los derivados lipoglicopéptidos semisintéticos telavancina, dalbavancina y oritavancina (Zeng et al., 2016).

Los glucopeptidos representan un arma fundamental en la lucha contra las bacterias farmacorresistentes, tal es el caso de la vancomicina que sigue siendo un tratamiento de referencia contra las infecciones graves por Gram positivos después de más de 50 años de su introducción (Blaskovich et al., 2018).

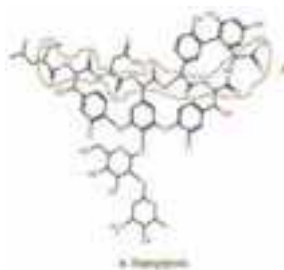


Figura 15. Estructura de la vancomicina. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Estreptograminas

Este grupo está conformado por dos compuestos químicamente distintos:

- Grupo A: Macrolactonas cíclicas poliinsaturadas que contienen un anillo oxazol.
- Grupo B: Hepta/hexa-depsipéptidos cíclicos con un esqueleto de aminoácidos con variaciones según el

compuesto.

Originalmente, son mezclas naturales producidas por diferentes miembros de *Streptomyces* o géneros relacionados, en donde cada productor sintetiza una mezcla de varios componentes A y B en proporciones diferentes (Garza-Velasco et al., n.d.).

Actualmente, la única estreptogramina aprobada es la sinercida, una combinación de quinupristina/dalfopristina en proporción 30:70. Ambos componentes son derivados sintéticos de la pristina-micina. En clínica, se usa principalmente para tratar infecciones por Gram-positivos, entre ellos: *S. aureus*, *S. epidermidis*, enterococcus resistentes a la meticilina y *E. faecium* resistente a la vancomicina (Gruenberg, et al, 2023).

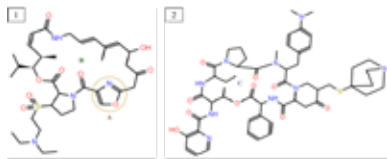


Figura 16. 1) Estructura de la quinupristina ; 2) Estructura de la dalfopristina. (Schwarz, et al, 2016). Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Rifampicina

Agente bactericida semisintético de amplio espectro, derivado de rifamicina B sintetizada por *Streptomyces mediterranei*. Clínicamente es útil para enfermedades como la lepra y la tuberculosis, es útil en el tratamiento de meningitis por las características lipofílicas de la molécula (Vardanyan & Hruby, 2016).

Las rifamicinas pertenecen a la familia de las ansamicinas que tienen estructura en forma de canasta y una cadena alifática que conecta dos extremos de un núcleo de naftoquinona; en el caso particular de la rifampicina, se trata de un derivado 3-(4-metil-1-piperazinil)-iminometilo de la rifamicina B. (Maslow & Portal-Celhay, 2015).



Figura 17. Estructura química de la rifampicina. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Cicloserina

La D-cicloserina (DCS) es un antibacteriano producido por *Streptomyces lavendulae* y *S. garyphalus* descubierto simultáneamente por Merck y Lilly en 1951. Es una 4-amino-1,2-oxazolidin-3-ona que tiene configuración R (de Chiara et al., 2020).

Su utilidad es reducida debido a que es un coagonista del receptor del ácido N-metil-D-aspartico (NMDA) en el cerebro. Se une al sitio modulador de la glicina del receptor NMDA y provoca efectos secundarios adversos, como convulsiones y neuropatía periférica, su uso como antibacteriano se limita a infecciones por *M. tuberculosis*, salvo las más recalcitrantes (Batson et al., 2017).

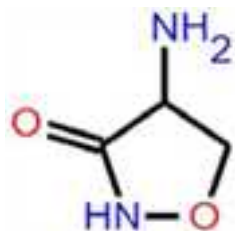


Figura 18. Estructura de la cicloserina. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Lincosamidas

Compuestos bacteriostáticos producidos por *Streptomyces*; destacan las lincominas (A y B), Bu-2545 y celesticetina.

Estructuralmente las lincosamidas tienen un núcleo tiooctosa (alquiltio-lincosamida) unido a una fracción alquil-prolina (Wang et al., 2020).

El primer integrante de este grupo, la lincomicina A, utilizada clínicamente en humanos, cerdos, perros y gatos, se aisló en 1962 de *Streptomyces lincolnensis*. Debido a el parecido estructural que presenta con el extremo 3' del ARN de transferencia I-Pro-Met (ARnt) y el ARnt desacetilado, es capaz de unirse al dominio peptidiltransferasa de la subunidad ribosómica 50S y bloquear la síntesis proteica bacteriana. Se autorizó en 1967, en Estados Unidos para el tratamiento de infecciones causadas por bacterias Gram-positivas. Pese a estar aprobada en humanos, raramente es empleada en ellos. Se emplea para tratar infecciones bacterianas en aquellos pacientes con alergia o sensibilidad a penicilina, cefalosporina y macrólidos. Su espectro limitado (*Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pneumoniae*, *Streptococcus* Grupos A, B, C y G, *Streptococcus pyogenes* y *Peptostreptococcus* spp.), llevó a su modificación química para mejorar la farmacocinética y ampliar su espectro. A partir de ella se derivó la clindamicina, 7-cloro-7-deoxo lincomicina. Aprobada en 1970 por la FDA. Presenta actividad contra *Plasmodium* spp. y *Toxoplasma* spp (Schwarz et al., 2016; Wang et al., 2020)



Figura 19. 1) Estructura química de lincosamidas. 2) Estructura de lincosamida A y clindamicina. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Getólidos

Familia derivada de los macrólidos, específicamente de la eritromicina A, que surge para combatir a los microorganismos *Streptococcus pneumoniae* y *Staphylococcus aureus* resistente a macrólidos, el primer fármaco de este grupo llevado a la clínica fue la telitromicina (Cobos-Trigueros et al., 2009).

Comparten una estructura similar a los macrólidos, sin embargo, las modificaciones incluyen: el cambio de la cladinosa en posición 3 por un grupo ceto; la incorporación de un resto cíclico en posición 11,12 o 6, 11; finalmente, en el anillo macrocíclico se ancla una cadena lateral de heteroaril-alquilo (Figura 20) (Van Bambeke et al., 2008).



Figura 20. 1) Núcleo farmacóforo de los cetólidos; 2) Estructura de la telitromicina. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Quinolonas

Descubiertas a principios de 1960, son antimicrobianos sintéticos de amplio espectro, análogos del ácido nalidíxico, primer integrante de esta familia, que se sintetizó como producto de la obtención de la cloroquina. Utilizadas en el tratamiento de infecciones de tracto urinario, algunas enfermedades de transmisión sexual e infecciones de vías respiratorias bajas. (Naem et al., 2016).

Contienen una estructura central con 2 anillos de 6 miembros fusionados relacionada con el compuesto 4-quinolona (compuesto orgánico derivado de la quinolina), se dividen en dos clases distintas: las 2 y 4-quinolonas, que son moléculas bicíclicas que difieren en la posición del grupo carbonilo. Para obtener compuestos con distinta composición química, farmacocinética y propiedades físicas, se puede modificar estructuralmente a N-1, C-5, C-6, C-7, C-8 (Dhiman et al., 2019) (Figura 21).

La naturaleza de "X" en la estructura diferencia el tipo de molécula que es, así pues X= C define quinolonas, mientras que X=

N define naftiridonas. Al modificar otros sustituyentes diferentes, la actividad antibacteriana mejora: R1 aumenta la potencia general (grupo ciclopropilo); R5 y R6 incrementan la actividad frente a bacterias Gram positivas (grupos -NH₂, -OH y -CH₃) y Gram negativas (Flúor), de igual forma R7 aumenta la actividad para los dos



Figura 21. 1) Estructura química de las quinolonas; 2) Estructura de la norfloxacin. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013)

Fosfomicina

Aislada en 1969 de *Streptomyces* spp., (*S. fradiae*, *S. viridochromogenes*, *S. wedmorensis*). La fosfomicina es un bactericida de amplio espectro, análogo al fosfoenolpiruvato (PEP) producido también de forma sintética, considerada un agente antibiótico viejo. Su éxito radica en su capacidad de atacar biopelículas y la actividad sinérgica que muestra con los lactámicos o la amikacina (Falagas et al., 2016).

Derivado del ácido fosfónico (ácido cis-1,2-epoxipropilfosfónico) altamente polar de bajo peso molecular. Las 2 formulaciones disponibles son: sal de calcio (fosfomicina cálcica, C₃H₅CaO₄P) para administración oral y la sal disódica hidrófila (fosfomicina disódica, C₃H₅Na₂O₄P) para administración parenteral (Falagas et al., 2016).

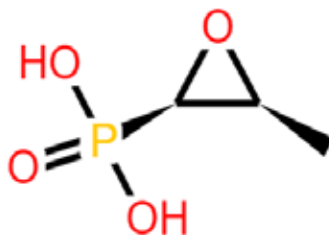


Figura 22. Estructura química de la fosfomicina. Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013)

Oxazolidinonas

Elaborado con JSME (Bienfait & Ertl, 2013).

Representa una nueva clase química de antimicrobianos sintéticos. Son moléculas bacteriostáticas que estructuralmente no tienen relación con ningún agente disponible en la clínica (Marchese & Schito, 2001). El núcleo farmacóforo está conformado por un anillo oxazolidona con configuración S del sustituyente en C5, importante para su actividad, un grupo acilamino metilo unido a C5, se puede sustituir por otros grupos bioisóstericos (grupos que sustituyen a otro que genera problemas, conservando una actividad biológica similar) y, el sustituyente N-arilo (anillo B), requerido para su actividad antibacteriana. La sustitución meta-flúor en el anillo B mejora su actividad y farmacocinética, mientras que la para-sustitución amplía el espectro. El linezolid fue descubierto en 1996 y aprobado en 2000 para uso clínico por la FDA, fue la primera oxazolidinona clínicamente disponible (Foti et al., 2021).

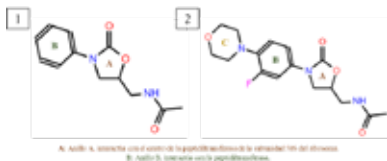


Figura 23. 1) Núcleo farmacóforo de las oxazolidinonas; 2) Estructura del Linezolid

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado por la beca otorgada a R.V.G y L.R.M través de proyecto VIEP 2023 ID Proyecto: 00055 "Análisis del genoma de *E. coli* patógena extraintestinal y comensal para la prevención, control y tratamiento adecuados de infección de tracto urinario" para el fortalecimiento de investigación.

Referencias

- Aithal P. A., & Aithal, S. (2018). The Concept of Ideal Drug & its Realization Opportunity using Nanopharmaceutical Research Scenario. *International Journal of Health Sciences and Pharmacy*, 2(2), 11–26. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1469963>
- Bastos, L., de Oliveira, A., Watkins, L., Moraes, M., & Coelho, M. (2012). Tetracyclines and pain. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, 385, 225–241. <https://doi.org/10.1007/s00210-012-0727-1>
- Batson, S., De Chiara, C., Majce, V., Lloyd, A. J., Gobec, S., Rea, D., Fülöp, V., Thoroughgood, C. W., Simmons, K. J., Dowson, C. G., Fishwick, C. W. G., De Carvalho, L. P. S., & Roper, D. I. (2017). Inhibition of D-Ala:D-Ala ligase through a phosphorylated form of the antibiotic D-cycloserine. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/S41467-017-02118-7>
- Bienfait, B., & Ertl, P. (2013). JSME: A free molecule editor in JavaScript. *Journal of Cheminformatics*, 5(5). <https://doi.org/10.1186/1758-2946-5-24>
- Bin Hafeez, A., Jiang, X., Bergen, P. J., & Zhu, Y. (2021). Antimicrobial Peptides: An Update on Classifications and Databases. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(21). <https://doi.org/10.3390/IJMS22211691>
- Blaskovich, M. A. T., Hansford, K. A., Butler, M. S., Jia, Z., Mark, A. E., & Cooper, M. A. (2018). Developments in Glycopeptide Antibiotics. *ACS Infectious Diseases*, 4(5), 715. <https://doi.org/10.1021/ACSINFECDIS.7B00258>
- Chopra, I., & Roberts, M. (2001). Tetracycline Antibiotics: Mode of Action, Applications, Molecular Biology, and Epidemiology of Bacterial Resistance. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 65(2), 232. <https://doi.org/10.1128/MMBR.65.2.232-260.2001>
- Cobos-Trigueros, N., Ateka, O., Pitart, C., & Vila, J. (2009). Macrolides and ketolides. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 27(7), 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2009.06.002>
- de Chiara, C., Homšak, M., Prosser, G. A., Douglas, H. L., Garza-Garcia, A., Kelly, G., Purkiss, A. G., Tate, E. W., & de Carvalho, L. P. S. (2020). d-Cycloserine destruction by alanine racemase and the limit of irreversible inhibition. *Nature Chemical Biology*,

Dhiman, P., Arora, N., Thanikachalam, P. V., & Monga, V. (2019). Recent advances in the synthetic and medicinal perspective of quinolones: A review. In *Bioorganic Chemistry* (Vol. 92). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2019.103291>

Dinos, G. P., Athanassopoulos, C. M., Missiri, D. A., Giannopoulou, P. C., Vlachogiannis, I. A., Papadopoulos, G. E., Papaioannou, D., & Kalpaxis, D. L. (2016). Chloramphenicol Derivatives as Antibacterial and Anticancer Agents: Historic Problems and Current Solutions. *Antibiotics* 2016, Vol. 5, Page 20, 5(2), 20. <https://doi.org/10.3390/ANTIBIOTICS5020020>

Epaulard, O., & Brion, J.-P. (2010). Fenicoles (cloranfenicol y tianfenicol). *EMC - Tratado de Medicina*, 14(1), 1–6. [https://doi.org/10.1016/S1636-5410\(10\)70519-5](https://doi.org/10.1016/S1636-5410(10)70519-5)

Estrada, A., Wright, D. L., & Anderson, A. C. (2016). Antibacterial Antifolates: From Development through Resistance to the Next Generation. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 6(8). <https://doi.org/10.1101/CSHPERSPECT.A028324>

Etebu, E., & Arikekpar, I. (2016). Antibiotics: Classification and mechanisms of action with emphasis on molecular perspectives. *IJAMBR*, 4, 90–101.

Falagas, M. E., Vouloumanou, E. K., Samonis, G., & Vardakasa, K. Z. (2016). Fosfomycin. *Clinical Microbiology Reviews*, 29(2), 321–347. <https://doi.org/10.1128/CMR.00068-15/FORMAT/EPUB>

Foti, C., Piperno, A., Scala, A., & Giuffrè, O. (2021). Oxazolidinone Antibiotics: Chemical, Biological and Analytical Aspects. *Molecules*, 26(14), 4280. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26144280>

Garza-Velasco, R., Gabriela Vilchis-Gaona, E., Hernández-Gómez, L., & Manuel Perea-Mejía, L. (n.d.). Estreptograminas: un modelo interesante para hacerle frente a la resistencia bacteriana.

Gómez, J., García-Vázquez, E., & Hernández-Torres, A. (2015). Los betalactámicos en la práctica clínica. *Rev Esp Quimioter*, 28(1), 1–9.

Grossman, T. H. (2016). Tetracycline Antibiotics and Resistance. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 6(4), a025387. <https://doi.org/10.1101/025387>

- Hutchings, M., Truman, A., & Wilkinson, B. (2019). Antibiotics: past, present and future. *Current Opinion in Microbiology*, 51, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.MIB.2019.10.008>
- Huttner, A., Verhaegh, E. M., Harbarth, S., Muller, A. E., Theuretzbacher, U., & Mouton, J. W. (2015). Nitrofurantoin revisited: a systematic review and meta-analysis of controlled trials. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 70(9), 2456–2464. <https://doi.org/10.1093/JAC/DKV147>
- Kelesidis, T., & Falagas, M. E. (2015). The safety of polymyxin antibiotics. *Expert Opinion on Drug Safety*, 14(11), 1687. <https://doi.org/10.1517/14740338.2015.1088520>
- Krause, K. M., Serio, A. W., Kane, T. R., & Connolly, L. E. (2023). Aminoglycosides: An Overview. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 6(6), 1–18. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a027029>
- Ledger, E. V. K., Sabnis, A., & Edwards, A. M. (2022). Polymyxin and lipopeptide antibiotics: membrane-targeting drugs of last resort. *Microbiology*, 168(2), 1136. <https://doi.org/10.1099/MIC.0.001136>
- López Nigro, M. M., & Carballo, M. A. (2008). LOS NITROIMIDAZOLES COMO MODELO DE MUTAGÉNESIS QUÍMICA Y MUERTE CELULAR NITROIMIDAZOLES AS A MODEL FOR CHEMICAL MUTAGENESIS AND CELL DEATH. *Theoria*, 17(2), 47–62.
- Marchese, A., & Schito, G. C. (2001). The oxazolidinones as a new family of antimicrobial agent. *Clinical Microbiology and Infectious Diseases*, 7(4), 66–74. <https://doi.org/10.1046/j.1469-0691.2001.00060.x>
- Marín, M., & Gudiol, F. (2003). Antibióticos betalactámicos. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 21(1), 42–55. [https://doi.org/10.1016/S0213-005X\(03\)72873-0](https://doi.org/10.1016/S0213-005X(03)72873-0)
- Maslow, M. J., & Portal-Celhay, C. (2015). Rifamycins. In Mandell, Douglas, and Bennett's Principles and Practice of Infectious Diseases (Vol. 1, pp. 339–349.e3). W.B. Saunders. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-4801-3.00027-8>
- Naeem, A., Lal Badshah, S., Muska, M., Ahmad, N., & Khan, K. (2016). The Current Case of Quinolones: Synthetic Approaches and Antibacterial Activity.

Molecules, 21(4). <https://doi.org/10.3390/molecules21040268>

Nguyen, R., Khanna, N. R., Safadi, A. O., & Sun, Y. (2022, November 21). Bacitracin Topical. StatPearls; StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK536993/>

Noriega, S., Cardoso-Ortiz, J., López-Luna, A., Cuevas-Flores, M. D. R., & Flores De La Torre, J. A. (2022). The Diverse Biological Activity of Recently Synthesized Nitro Compounds. *Pharmaceuticals*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/PH15060717>

Patel, P. H., & Hashmi, M. F. (2023, February 19). Macrolides. StatPearls; StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK551495/>

Pérez Alba, Á. (2016). Sulfamidas: aspectos farmacológicos y químico-farmacéuticos.

Pfeffer, S., Höhne, W., Branner, S., Wilson, K., & Betzel, C. (1991). X-Ray structure of the antibiotic bacitracin A. *FEBS Letters*, 285(1), 115–119. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(91\)80738-O](https://doi.org/10.1016/0014-5793(91)80738-O)

Pham, T. D. M., Ziora, Z. M., & Blaskovich, M. A. T. (2019). Quinolone antibiotics. *MedChemComm*, 10(10), 1719–1739. <https://doi.org/10.1039/C9MD00120D>

Schwarz, S., Shen, J., Kadlec, K., Wang, Y., Michael, G. B., Feßler, A. T., & Vester, B. (2016). Lincosamides, Streptogramins, Phenicols, and Pleuromutilins: Mode of Action and Mechanisms of Resistance. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 6(11). <https://doi.org/10.1101/CSHPERSPECT.AO27037>

Serio, A. W., Keepers, T., Andrews, L., & Krause, K. M. (2018). Aminoglycoside Revival: Review of a Historically Important Class of Antimicrobials Undergoing Rejuvenation. *EcoSal Plus*, 8(1). https://doi.org/10.1128/ECOSALPLUS.ESP-0002-2018/ASSET/OEFF6678-ED27-426B-9CD3-55733364AD55/ASSETS/GRAPHIC/ESP-0002-2018_FIG_004.GIF

Suárez, C., & Gudíol, F. (2009). Antibióticos betalactámicos. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 27(2), 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2008.12.001>

Van Bambeke, F., Harms, J. M., Van Laethem, Y., & Tulkens, P. M. (2008). Ketolides: Pharmacological profile and rational positioning in the treatment

of respiratory tract infections. In Expert Opinion on Pharmacotherapy (Vol. 9, Issue 2, pp. 267–283). <https://doi.org/10.1517/14656566.9.2.267>

Vardanyan, R., & Hruby, V. (2016). Antimicrobial Drugs (pp. 669–675). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411492-0.00032-8>

Vicente, D., & Pérez-Trallero, E. (2010). Tetraciclinas, sulfamidas y metronidazol. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 28(2), 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.EIMC.2009.10.002>

Wang, S. A., Lin, C. I., Zhang, J., Ushimaru, R., Sasaki, E., & Liu, H. W. (2020). Studies of lincosamide formation complete the biosynthetic pathway for lincomycin A. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(40), 24794–24801. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2009306117/-/DCSUPPLEMENTAL>

Wijma, R. A., Huttner, A., Koch, B. C. P., Mouton, J. W., & Muller, A. E. (2018). Review of the pharmacokinetic properties of nitrofurantoin and nitroxoline. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 73(11), 2916–2926. <https://doi.org/10.1093/JAC/DKY255>

Wróbel, A., Arciszewska, K., Maliszewski, D., & Drozdowska, D. (2019). Trimethoprim and other nonclassical antifolates an excellent template for searching modifications of dihydrofolate reductase enzyme inhibitors. *The Journal of Antibiotics* 2019 73:1, 73(1), 5–27. <https://doi.org/10.1038/s41429-019-0240-6>

Zeng, D., Debabov, D., Hartsell, T. L., Cano, R. J., Adams, S., Schuyler, J. A., McMillan, R., & Pace, J. L. (2016). Approved Glycopeptide Antibacterial Drugs: Mechanism of Action and Resistance. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 6(12). <https://doi.org/10.1101/CSHPERSPECT.A026989>

Zhu, M., Tse, M. W., Weller, J., Chen, J., & Blainey, P. C. (2021). The future of antibiotics begins with discovering new combinations. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1496(1), 82–96. <https://doi.org/10.1111/NYAS.14649>

Zin, P. P. K., Williams, G., & Fourches, D. (2018). Cheminformatics-based enumeration and analysis of large libraries of macrolide scaffolds. *Journal of Cheminformatics*, 10(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/S13321-018-0307-6/FIGURES/1>

CHERNÓBIL COMO UN LABORATORIO NATURAL: LA ECOLOGÍA DE UNA ZONA PROHIBIDA

CHERNOBYL AS A NATURAL LABORATORY: ECOLOGY IN A RESTRICTED ZONE

Roberto Espinosa-Hernández

Tamara Castillo-Montero

Barbara Moguel

Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ciencias,
Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Ex Hacienda Santa
Catarina Mártir, C.P. 72810, San Andrés Cholula, Puebla, México.

jose.espinosahe@udlap.mx; tamara.castillomo@udlap.mx barbara.
moguel@udlap.mx

<https://orcid.org/0009-0004-0476-999X>

<https://orcid.org/0009-0004-8615-8171>

<https://orcid.org/0000-0002-4489-0055>

Recibido 25/junio/2025

Revisado: 6/agosto/2025

Publicado 30/agosto/2025

A11N91.25/1007

Resumen

Tras el accidente nuclear de Chernóbil en 1986, los ecosistemas de la Zona de Exclusión experimentaron efectos graves como la muerte masiva de árboles, la reducción de la biodiversidad vegetal y la alteración de las cadenas alimenticias. Sin embargo, con el paso de los años, surgieron evidencias de adaptación biológica, reorganización trófica y recuperación funcional. Este trabajo analiza cómo la naturaleza se ha reestructurado en Chernóbil desde una perspectiva ecológica, utilizando conceptos como el cambio continuo, la sucesión ecológica, los flujos de energía y los controles tróficos. Se incluyen estudios de caso como el cambio en los modos de reproducción de oligoquetos, la aparición de adaptaciones epigenéticas en plantas y animales, y el papel de los hongos radiotróficos que metabolizan radiación a través de radiosíntesis. Además, se utilizó análisis de imágenes satelitales NDVI de 1991, 2017 y 2025 para evaluar la recuperación de la cobertura vegetal. Los resultados muestran un aumento sostenido en la densidad de vegetación y la recolonización del área por especies silvestres, lo que evidencia la resiliencia de los ecosistemas. Este ensayo posiciona a Chernóbil como una zona de estudio para comprender cómo los seres vivos responden y se reorganizan frente a desastres.

Palabras clave: Chernóbil, radionúclidos, sucesión ecológica, cambio continuo, Zona de Exclusión de Chernóbil, cadena trófica, adaptación.

Abstract

Following the 1986 Chernobyl nuclear accident, ecosystems within the Exclusion Zone experienced severe effects such as mass tree mortality, a reduction in plant biodiversity, and disruption of food chains. However, over time, evidence of biological adaptation, trophic reorganization, and functional recovery emerged. This study analyzes how nature has restructured in Chernobyl from an ecological perspective, using concepts such as continuous change, ecological succession, energy flow, and trophic controls. Case studies include changes in oligochaete reproductive strategies, the emergence of epigenetic adaptations in plants and animals, and the role of radiotrophic fungi that metabolize radiation through radiosynthesis. Additionally, NDVI satellite imagery from 1991, 2017, and 2025 was used to assess vegetation recovery. Results show a sustained increase in vegetation density and the recolonization of the area by wild species, demonstrating the resilience of ecosystems. This essay positions Chernobyl as a study area for understanding how living organisms respond and reorganize in the face of disasters.

Keywords: Chernobyl, radionuclides, ecological succession, continuous change, Chernobyl Exclusion Zone, food chain, adaptation.

Introducción



Figura 1. Ubicación de la planta nuclear de Chernóbil, Ucrania. Elaboración propia.

El 26 de abril de 1986 ocurrió un accidente en la Central Nuclear de Chernóbil, en Ucrania (Figura 1). Este evento sigue siendo el desastre nuclear más grave registrado y uno de los mayores desastres ambientales provocados por el ser humano (Crea, 2022). Cerca del 95% del territorio ucraniano experimentó altos niveles de contaminación radioactiva, alcanzándose actividades de partículas en el aire hasta un millón de veces superiores a los niveles previos al accidente (Arestov et al., 2024; Yablokov et al., 2009). Esta liberación causó una contaminación extensa y desigual del área, provocando diferentes respuestas biológicas complejas que impactaron desde células individuales (nivel celular y molecular) hasta ecosistemas enteros (Chernobyl Forum Expert Group 'Environment' & Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006; Geras'kin et al., 2006).

El accidente ocurrió en una zona con un ecosistema muy activo, permitiendo observar dos tipos de efectos: efectos agudos, que hacen referencia a efectos inmediatos, como la muerte de organismos o pérdida de capacidades reproductivas y efectos a largo plazo, como cambios en la biodiversidad o anomalías genéticas (Geras'kin et al., 2006). Los organismos más afectados se encontraban en el área más cercana al reactor, también conocida como la Zona de Exclusión de Chernóbil, un área de 30 km alrededor del lugar del accidente (Geras'kin et al., 2006). Entre los impactos más severos se destaca

la muerte de 600 hectáreas de árboles como pinos, abetos y la disminución drástica en la densidad de las plantas (Geras'kin et al., 2006). Por ejemplo, en 1987 (dos años después del accidente), en el pueblo de Yanov, la vegetación se redujo de 740 a 310 plantas por metro cuadrado (Santos et al., 2019; Geras'kin et al., 2006).

Los primeros 10-20 días después del accidente fueron los más peligrosos para la comunidad biológica, debido a la liberación de radionúclidos de vida corta como el Cesio-137 (Cs-137) y el Estroncio-90 (Sr-90) (Yablokov et al., 2009). Los radionúclidos son elementos químicos que al estar llenos de radioactividad son inestables, y conforme liberan esa radioactividad se vuelven estables (Diccionario de Cáncer del NCI, s.f.). Estos elementos se acumularon en el suelo, cuerpos de agua y los organismos vivos, provocando una contaminación continua de los ecosistemas acuáticos (Yablokov et al., 2009). Aunque la contaminación inicial de lagos y ríos fue elevada debido a la deposición directa, ésta disminuyó rápidamente por procesos de dilución, degradación física y, sobre todo, por absorción en los suelos, que funcionaron como depósitos radioactivos de largo plazo (Chernobyl Forum Expert Group 'Environment' & Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006). No obstante, estos radionúclidos* continuaron migrando verticalmente en el suelo a un ritmo de 2 a 4 cm al año, afectando a las plantas con raíces profundas que, al crecer, reintroducen estos contaminantes a la superficie (Yablokov et al., 2009).



Figura 2. Cultivo de *Cladosporium cladosporioides*. Retraído de: <https://www.adelaide.edu.au>

A pesar de este escenario hostil, la vida encontró formas de adaptarse. Algunos organismos no solo sobrevivieron, sino que prosperaron. Entre ellos se destacan varios hongos radiotróficos como *Cladosporium sphaerospermum*, *Cryptococcus neoformans* y *Wangiella dermatitidis*, capaces de usar la radiación como fuente de energía a través de un proceso conocido como radiosíntesis (Ledford, 2007; Tugay et al., 2011). El éxito que tuvieron al adaptarse ha despertado mucho interés en la comunidad científica ya que tiene un potencial para aplicaciones biotecnológicas y para limpiar el ambiente, también conocido como biorremediación (Ledford, 2007; Harms et al., 2011).

Este artículo analiza cómo la Zona de Exclusión de Chernóbil ha cambiado en cobertura vegetal entre 1991, 2017 y 2025, utilizando herramientas ecológicas y mapas satelitales en formato NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), para comprender cómo se reorganiza y adapta la naturaleza frente a condiciones extremas. Además de poder investigar la dinámica de los ecosistemas perturbados, especialmente la sucesión ecológica, los flujos de energía, los controles tróficos y el concepto de cambio continuo en la naturaleza, que se explicarán más adelante.

Desarrollo

1. Cambio continuo en ecosistemas perturbados

Después de una perturbación tan severa como el accidente nuclear de Chernóbil, los ecosistemas no pueden quedarse igual, necesitan transformarse para poder seguir funcionando, tanto a nivel biológico (organismos vivos como plantas, animales y microorganismos) como a nivel funcional (ciclos de nutrientes y energía) (Gurevitch et al., 2020). Este tipo de respuesta implica una reorganización constante de las especies, sus interacciones y funciones. En ecología, a este proceso de adaptación constante se le conoce como cambio continuo (Gurevitch et al., 2020).

Algunos gusanos planos (como los oligoquetos) pueden reproducirse asexualmente partiéndose en dos... ¡y cada mitad regenera el cuerpo completo! Una evidencia clara de este cambio continuo se observó en varios organismos de Chernóbil. Específicamente en los gusanos acuáticos llamados oligoquetos (Geras'kin et al., 2006). Normalmente estos gusanos se reproducen de forma asexual, lo que quiere decir que no necesitan a otro individuo para reproducirse, crean una réplica o copia exacta de su genética (Equipo editorial, Etecé, 2024; Geras'kin et al., 2006). Sin embargo, en un depósito artificial de agua cercano a Yanov, la radiación alcanzó los 0.34 mGy/día, lo que aumentó la reproducción sexual en estos organismos (Geras'kin et al., 2006). Este cambio permitió que la población pudiera adaptarse al nuevo ambiente, ya que desarrollaron diversidad genética, una combinación única de genes por individuo (Geras'kin et al., 2006; Diversidad Genética, 2024). Un Gray (Gy) es una unidad derivada del Sistema Internacional de Unidades que mide la dosis absorbida de radiaciones ionizantes por un determinado material. Un m/Gy es una unidad de absorción de la radiación equivalente a la milésima parte de un gray, o 0.1 rad (U.S.NRC, 2021; Radiological Society of North America (RSNA) and American College of Radiology (ACR), n.d.).



Figura 3. Imagen de oligoqueto. Retraído de: <https://ecuadorg>

Algo similar ocurrió con muchas plantas y animales expuestos a radiación. Algunos estudios a largo plazo demostraron que varias especies desarrollaron adaptaciones genéticas y epigenéticas, es decir, que el entorno tiene un impacto en los genes que se activan o desactivan, aumentando su resistencia a la radiación

(Chernobyl Forum Expert Group 'Environment' & Vienna : International Atomic Energy Agency, 2006; Geras'kin et al., 2006; Anzilotti, 2022). En otras palabras, las poblaciones más resistentes lograron sobrevivir y reproducirse, a este fenómeno se le conoce como selección natural y es el principal motor del cambio continuo (Dominguez et al., 2008).

2. Sucesión ecológica post-radiación

Cuando nuevas especies empiezan a colonizar y reemplazar a otras que desaparecieron, se le denomina sucesión ecológica (Gurevitch et al., 2020). Esta sucesión ocurre de forma lenta y progresiva, y el resultado depende de qué tan rápido se logren adaptar las nuevas especies al entorno, por el tipo de perturbación, disponibilidad de nutrientes y capacidad para colonizar (Gurevitch et al., 2020).

Como se mencionó anteriormente, las zonas más afectadas, como los bosques de pino o de abeto murieron a causa de una dosis letal de radiación (Geras'kin et al., 2006; Santos et al., 2019). En su lugar, comenzaron a crecer especies como los abedules, álamos y robles, estos toleraban mejor los cambios en el suelo y el aire (Geras'kin et al., 2006; Santos et al., 2019; Chernobyl Forum Expert Group 'Environment' & Vienna : International Atomic Energy Agency, 2006). Estos cambios también se notaron en campos agrícolas abandonados en donde surgieron especies silvestres de hierbas y pastos que atrajeron a insectos adaptados, como saltamontes y grillos (Geras'kin et al., 2006; Santos et al., 2019; Chernobyl Forum Expert Group 'Environment' & Vienna : International Atomic Energy Agency, 2006).

Un caso interesante dentro de esta sucesión fue el de los hongos radiotróficos como *Cladosporium sphaerospermum*, *Cryptococcus neoformans* y *Wangiella dermatitidis* (Ledford, 2007). Estos organismos se adaptaron para poder generar energía y una fuente de alimentación con

base en la radiación (Ledford, 2007). Su pigmento oscuro, la melanina, les permitió protegerse de la radiación, ya que cambiaba sus propiedades aumentando la capacidad para transferir electrones y activar rutas metabólicas (Dadachova et al., 2007). Al poder alimentarse de la radiación, crecieron incluso sin tantos nutrientes en el suelo (Dadachova et al., 2007; Geras'kin et al., 2006; Tugay et al., 2011). Estos organismos se volvieron clave en las primeras etapas de la sucesión, ayudando a descomponer materia orgánica y facilitar el regreso de otras formas de vida (Kałucka & Jagodziński, 2017). La melanina es tan efectiva absorbiendo energía que los científicos están investigando su uso como protección contra la radiación en futuras misiones espaciales.

3. Controles tróficos y reorganización de cadenas alimenticias

Los controles tróficos determinan cómo fluye la energía entre los diferentes niveles de la cadena alimenticia, desde los productores primarios (como las plantas), los consumidores primarios y secundarios (como herbívoros y carnívoros), hasta los descomponedores (como microorganismos y hongos) (Reichle, 2019). Estos controles pueden ser desde arriba (por los depredadores que limitan a sus presas) o desde abajo (por la disponibilidad de recursos) (Reichle, 2019).

La muerte de árboles, como los mencionados anteriormente, especialmente de zonas con dosis de radiación de hasta 17 mGy/día, provocó una fuerte caída en la productividad primaria (Geras'kin et al., 2006; Santos et al., 2019; Chernobyl Forum Expert Group 'Environment' & Vienna : International Atomic Energy Agency, 2006). Esto quiere decir que había menos alimento y energía disponible para los consumidores primarios (herbívoros e insectos), lo que interrumpió las cadenas alimenticias desde la base (Reichle, 2019).

Además, algunas plantas expuestas a dosis entre 3.8 y 5.2 Gy mostraron esterilidad parcial o total, con daños visibles en flores y estructuras reproductivas (Geras'kin et al., 2006). Esta interrupción en su ciclo reproductivo provocó que hubiera un decrecimiento en su población, bloqueando el flujo de energía (Figura 4) (Reichle, 2019; Geras'kin et al., 2006).

Con la desaparición de los humanos, el estrés natural desapareció (Chernobyl Forum Expert Group 'Environment' & Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006). Lo que provocó que ciertas especies se extendieran sin restricciones. Tales como el jabalí, los alces, los lobos y roedores, ocupando nuevos hábitats y modificando el equilibrio trófico (Geras'kin et al., 2006). También se observaron casos de desincronización biológica, esto se refiere a cuando el reloj biológico interno de los organismos no está alineado con las señales ambientales externas (Delgado et al., 2009), como desfases entre el brote de las plantas y la eclosión de insectos que dependen de ellas, esto afectó los ritmos normales de interacciones ecológicas (Geras'kin et al., 2006).



Figura 4. Ejemplo de flujo de energía. Creación propia.

Los descomponedores, como los hongos melanizados o radiotróficos, jugaron un papel muy importante en el reciclaje y descomposición de materia orgánica (Tugay et al., 2011). Esto los convierte en nuevos vectores energéticos, lo que quiere decir que son capaces de sostener otras formas de vida microscópica en condiciones donde la fotosíntesis ya no es posible o es muy limitada (Kałucka & Jagodziński, 2017; Geras'kin et al., 2006; Tugay et al., 2011).

4. Análisis de imágenes satelitales NVDI



Figura 5. Ejemplo de recuperación de la vegetación. Creación propia.

Los Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (por sus siglas en inglés, NDVI), son herramientas ecológicas que nos ayudan a comprender cómo se organiza y adapta la vegetación frente a condiciones extremas. El uso de esta herramienta permitió evaluar los cambios en la densidad vegetal dentro de la Zona de Exclusión de Chernóbil en tres años: 1991, 2017 y 2025. Las imágenes muestran un patrón de aumento en la densidad vegetal con el paso del tiempo (Figura 5).

En 1991, cinco años después del accidente, predominaban los valores de vegetación baja y baja-moderada, con extensas áreas sin cobertura vegetal, probablemente debido a la radiación aguda y destrucción directa del ecosistema (Geras'kin et al., 2006; Figura 6).

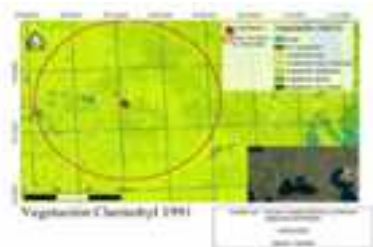


Figura 6. Densidad de vegetación en 1991 dentro de la Zona de Exclusión de Chernóbil. El color verde limón hace referencia a "vegetación baja". Creación propia.

En 2017, la vegetación mostró buena recuperación, gran parte del paisaje dentro de la zona presenta vegetación baja-moderada a moderada, especialmente hacia el sur, suroeste y noroeste del área de exclusión (Figura 7).

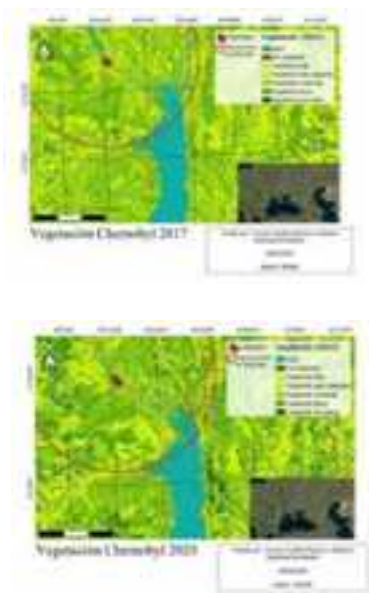


Figura 7. Densidad de vegetación en 2017 y 2025 dentro de la Zona de Exclusión de Chernóbil.

En el año 2025 se muestra un incremento de vegetación moderada a densa, con pequeños parches de vegetación muy densa, en las mismas zonas que en 2017 (Figura 7). Este incremento gradual puede deberse a la sucesión ecológica y a la ausencia de perturbaciones humanas.

Como se mencionó anteriormente, la desaparición del ser humano permitió que plantas resistentes a suelos contaminados, como álamo, abedules y especies herbáceas silvestres, colonizaran los espacios abandonados (Santos et al., 2019; Chernobyl Forum Expert Group 'Environment' & Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006). Así como adaptaciones genéticas y epigenéticas, que favorecieron la supervivencia de estas especies, a pesar de los niveles altos de radiación (Anzilotti, 2022).

Conclusión

El accidente nuclear de Chernóbil, en Ucrania continúa siendo el más grave registrado en la historia de la humanidad y uno de los más grandes desastres ambientales provocados por el ser humano

(Crea, 2022). Este evento causó una contaminación extensa, provocando diferentes respuestas biológicas que impactaron desde células hasta ecosistemas enteros (Chernobyl Forum Expert Group 'Environment' & Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006; Geras'kin et al., 2006). Los organismos más afectados se encontraban dentro de la Zona de Exclusión de Chernóbil, donde los radionúclidos de vida corta representaron el mayor peligro para la comunidad biológica. Sin embargo, organismos como hongos radiotróficos y gusanos oligoquetos fueron capaces de adaptarse a las nuevas condiciones gracias a sus características, volviéndose clave en las primeras etapas de la sucesión ecológica y siendo un claro ejemplo de cambio continuo.

A través del uso de NDVI se pudo observar la gradual recolonización de las plantas gracias a su capacidad de adaptación y a la ausencia del humano, lo cual tuvo como consecuencia la reestructuración de las cascadas tróficas (Figura 8), ya que ciertas especies como jabalíes o lobos pudieron extenderse sin límites ocupando nuevos hábitats.

Chernóbil es un ejemplo claro de cómo los organismos continúan y se adaptan a pesar de sufrir catástrofes inmensas. Estudiar este tipo de casos nos abre la puerta a posibles aplicaciones biotecnológicas y astrobiológicas tanto para la remediación de ecosistemas con radiación nuclear u otros contaminantes, como para próximas exploraciones especiales.



Figura 8: Ejemplo de cadena trófica. Creación propia.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia. Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Agradecimientos

Expresamos nuestra gratitud a la Dra. Barbara Moguel por su invaluable guía y apoyo a lo largo de este proyecto. Al igual, agradecemos a la Universidad de las Américas Puebla, por proveer los recursos e instalaciones necesarias. Reconocemos el uso de Copernicus Browser para la realización de los análisis NDVI, así como, el uso de QGIS para la elaboración de mapas. Este artículo no hubiera sido posible sin sus valiosas contribuciones.

Referencias

- Arestov, S., Bunyakova, Y., & Popova, M. (2024). Ecological and economic consequences of the accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and prospects for the development of tourism in the region. *Market Infrastructure*, 77. <https://doi.org/10.32782/infrastructure77-11>
- Anzilotti, A. W. (2022). Epigenética. Nemours. <https://kidshealth.org/es/parents/about-epigenetics.html>
- Chernobyl Forum Expert Group 'Environment', & Vienna: International Atomic Energy Agency. (2006). Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: Twenty years of experience (ISSN 1020-6566). International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1239_web.pdf
- Crea, J. A. (2022). Chernóbil: Daño y responsabilidad de la mayor catástrofe nuclear al renacer ambiental. *Revista Iberoamericana de Derecho, Cultura y Ambiente*. <https://aidca.org/wp-content/uploads/2022/06/RIDCA1-Chernobil-Dano-y-responsabilidad-De-la-mayor-catastrofe-nuclear-al-renacer-ambiental-AMBIENTAL.pdf>
- Dadachova, E., Bryan, R. A., Huang, X., Moadel, T., Schweitzer, A. D., Aisen, P., Nosanchuk, J. D., & Casadevall, A. (2007). Ionizing radiation changes the electronic properties of melanin and enhances the growth of melanized fungi. *PLoS ONE*, 2(5), e457. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000457>
- Delgado, R. C. S., Pardo, B. F., & Briones, C. E. (2009). Internal desynchrony as promotor of disease and behavioral disturbance. *Salud Mental*, 32(1), 69–76. <http://www.scielo.org.mx/pdf/sm/v32n1/v32n1a9.pdf>
- Diccionario de cáncer del NCI. (s. f.). Cancer.gov. <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/radionuclido>
- Diversidad genética. (2024, febrero 14). Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/interior/ambiente/biodiversidad/genetica>
- Domínguez, C. A., Fornoni, J., & Sosenski, P. (2008). ¿Qué es la selección natural? *CIENCIA*, 03(671). https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/60_4/PDF/03_671_SeleccionNatural.pdf
- Equipo editorial, Etecé. (2024, diciembre 25). Reproducción asexual - Qué es, tipos, ventajas y desventajas. Concepto. <https://concepto.de/reproduccion-asexual/>

Geras'kin, S., Fesenko, S., & Alexakhin, R. (2006). Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident. *Environment International*, 34(6), 880–897. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.012>

Gurevitch, J., Scheiner, S. M., & Fox, G. A. (2020). Community dynamics and succession. En Oxford University Press eBooks. <https://doi.org/10.1093/hesc/9781605358291.003.0016>

Harms, H., Schlosser, D., & Wick, L. Y. (2011). Untapped potential: Exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology*, 9(3), 177–192. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2519>

Kałużka, I. L., & Jagodziński, A. M. (2017). Ectomycorrhizal fungi: A major player in early succession. En Springer eBooks (pp. 187–229). https://doi.org/10.1007/978-3-319-53064-2_10

Ledford, H. (2007). Hungry fungi chomp on radiation. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/news070521-5>

Nación, L. (2020, diciembre 1). Un hongo de Chernobyl, la clave para proteger a los astronautas de la radiación en la misión a Marte. *La Nación*. <https://www.lanacion.com.ar/tecnologia/un-hongo-chernobyl-clave-protector-astronautas-radiacion-nid2405774/>

Radiological Society of North America (RSNA) & American College of Radiology (ACR). (s. f.). *Radiologyinfo.org*. <https://www.radiologyinfo.org/>

Reichle, D. E. (2019). Food chains and trophic level transfers. En Elsevier eBooks (pp. 95–117). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820244-9.00007-x>

Santos, P., Sillero, N. P., Boratyński, Z., & Teodoro, A. C. M. (2019). Landscape changes at Chernobyl. *Proceedings*, 6, 70. <https://doi.org/10.1117/12.2532564>

Tugay, T. I., Zheltonozhskaya, M. V., Sadovnikov, L. V., Tugay, A. V., & Farfán, E. B. (2011). Effects of ionizing radiation on the antioxidant system of microscopic fungi with radioadaptive properties found in the Chernobyl exclusion zone. *Health Physics*, 101(4), 375–382. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e3181f56bf8>

U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). (2021). Gray (Gy). NRC Web. <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/gray-gy.html>

Yablokov, A. V., Nesterenko, V. B., & Nesterenko, A. V. (2009). Chapter III. Consequences of the Chernobyl catastrophe for the environment. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1181(1), 221–286. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04830>

EXTRACTOS DE PLANTAS: UN COMPENDIO DE MOLECULAS PARA LA MEJORA DE LA AGRICULTURA DEL PRESENTE Y DEL FUTURO

PLANT EXTRACTS: A COMPENDIUM OF MOLECULES FOR IMPROVING AGRICULTURE OF THE PRESENT AND THE FUTURE

Miguel Ángel Medina-Morales (1),
Miriam Desirée Dávila-Medina (2),
Alberto Flores-Olivas (3),
Marisol Cruz-Requena*(3)

(1) Departamento de Biotecnología, Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad Autónoma de Coahuila. Blvd. V. Carranza e Ing. José
Cárdenas V. s/n. Col. República Ote, Saltillo, Coahuila, México, C.P.
25280.

(2) Departamento de Bioprocesos y Bioquímica Microbiana, Facultad
de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila. Blvd. V.
Carranza e Ing. José Cárdenas V. s/n. Col. República Ote, Saltillo,
Coahuila, México, C.P. 25280.

(3) Departamento de Parasitología, Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo,
Coahuila, México, C.P. 25315. Teléfono +52 8444110209.

*Autor de correspondencia: marisolcrequena@gmail.com;
miguel.medina@uadec.edu.mx;

desireedavila@uadec.edu.mx
aflooli50@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7142-6063>
<https://orcid.org/0000-0001-8897-0375>
<https://orcid.org/0000-0002-5641-4064>
<https://orcid.org/0000-0002-6146-6010>

Resumen

A lo largo del tiempo, las plantas han tenido un papel crucial en la evolución del ser humano debido a los múltiples usos que se les ha dado. Científicos de todo el mundo han evaluado el potencial de las plantas como biopesticidas debido a las diferentes moléculas que en ellas se encuentran. Tales como polifenoles o flavonoides, localizadas en una fracción que de estas plantas se obtiene, conocido como extracto vegetal, el mismo que ha demostrado un efecto antimicrobiano efectivo contra diversos microorganismos fitopatógenos que causan pérdidas significativas en diferentes cultivos. El uso de extractos vegetales como ingredientes en pesticidas contribuye con una agricultura más verde y sostenible, permitiendo que poco a poco se deje de lado los pesticidas químicos o sintéticos, productos que tienen efectos negativos para el ser humano y nuestro medioambiente. Diversas son las herramientas que se han desarrollado para el estudio y la aplicación de estos extractos vegetales, desde los métodos más básicos hasta la biotecnología o tecnologías emergentes como el ultrasonido o microondas. La suma de esfuerzos pasados, presentes y futuros nos da un indicio de que la agricultura va a tender a ser más verde y autosustentable, cuestión que favorece a todos por igual.

Palabras clave: Agricultura sostenible, biomoléculas, biotecnología, cultivos, fitopatógenos.

Abstract

Throughout time, plants have played an important role in human evolution due to the many uses that have been given to them. Scientists from all over the world have evaluated the potential of plants as biopesticides. This is due to the different molecules found in them, such as polyphenols or flavonoids. These are located in a fraction obtained from these plants known as plant extract, which has demonstrated an effective antimicrobial effect against various phytopathogenic microorganisms that cause significant losses in different crops. The use of plant extracts as ingredients in pesticides contributes to a greener and more sustainable agriculture, allowing chemical or synthetic pesticides to be gradually left aside, products that have negative effects on humans and the environment. Various tools have been developed for the study and application of these plant extracts, from the most basic methods to biotechnology or emerging technologies such as ultrasound and/or microwaves. The sum of past, present and future efforts gives us an indication that agriculture will tend to be greener and more self-sustaining, which benefits everyone equally.

Keywords: Sustainable agriculture, biomolecules, biotechnology, crops, phytopathogens.

Ocasionalmente, los precios de algunos productos del supermercado, como el limón o el chile serrano, aumentan. Esto puede deberse a diversos factores, como la falta de lluvias o enfermedades que afectan esos cultivos y reducen la producción, lo que provoca un aumento en los precios. Las plantas o cultivos son susceptibles, tal como los seres humanos, de verse amenazados por microorganismos patógenos. En el caso de plantas, fitopatógenos, los cuales pueden causar diversos daños en hojas, tallos, raíces y frutos. Esto a través de la alteración en el metabolismo celular de la planta por la secreción de enzimas, toxinas de estos microorganismos, o bien porque estos absorben nutrientes esenciales para el desarrollo y crecimiento del cultivo, que en casos extremos puede ocasionar la muerte de dicha planta (Pontes et al., 2020).

A través del tiempo y desde que se instaló la agricultura como forma de vida, se han creado diversos métodos para contrarrestar los efectos de las enfermedades ocasionadas por un considerable número de bacterias, virus, hongos fitopatógenos, los mismos que atacan a diversos de los cultivos más esenciales de frutas y verduras y que impactan de diversas maneras a las poblaciones. Estos métodos han evolucionado con el tiempo, utilizando ampliamente los biopesticidas químicos en un principio hasta el desarrollo e implementación de biopesticidas formulados por una amplia gama de extractos vegetales, una opción más verde y amigable con el medioambiente.

De enfermedades y otros demonios

Al igual que en los seres humanos, diversos microorganismos son los causantes de enfermedades en las plantas, las cuales pueden derivar en síntomas pequeños como marchitamiento de hojas o pérdidas de frutos, pero que también pueden ocasionar la muerte de la planta y por ende la cosecha completa. En este artículo nos centraremos en tres

de estos microorganismos antagonistas de los cultivos; virus, bacterias y hongos fitopatógenos.

Virus fitopatógenos

Los virus hacen de las suyas en cultivos de trascendencia como los cítricos. Entre ellos tenemos a uno perteneciente al género *Closterovirus* o comúnmente denominado el virus de la tristeza de los cítricos. Este virus provoca un decaimiento en la planta (de ahí su nombre), desarrollando agujeros en troncos y tallos y amarillamiento en sus hojas. La forma de contagio es a través de vectores que transportan este virus. Generalmente son insectos como pulgones, o bien, mediante los injertos. Estos son básicamente la incorporación de yemas a la planta con la finalidad de acelerar el crecimiento de la planta y consecuentemente de frutos (Figura 1)

(Palacios et al., 2020).



Figura 1. Diagrama general de la forma de propagación del virus de la tristeza de los cítricos.

Pero no solo los cítricos son víctimas de los virus; larga es la lista de cultivos que sufren a causa de estos fitopatógenos. Un grupo muy susceptible son los frutos rojos. De los cuales se han reportado una amplia variedad de este tipo de patógeno.

nos emergentes. Entre las especies de virus se pueden mencionar las siguientes: Blueberry shock virus, Cherry leaf roll virus, Bluberry necrotic ring blotch, Bluberry scorch virus. Estos causan diversos daños a los cultivos, presentando diversos síntomas como marchitamiento total de las flores, necrosis del follaje joven o muerte del tallo, moteado clorótico, retraso del crecimiento e incluso muerte de la planta, entre otros síntomas y dependiendo del tipo de virus o cultivo del que se trate (Saad et al., 2021).

Mencionamos solamente algunos virus patógenos de cultivos comunes; sin embargo, debemos considerar que la lista de este tipo de patógenos es muy amplia, tanto en número como en síntomas y tipo de cultivo.

planta, hasta tal grado que puede conducir a la muerte del cultivo (Figura 2) (Basma et al., 2024).



Figura 2. Planta de tomate infectada con *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*. Foto tomada de <https://prod.senasica.gob.mx/ALERTAS/inicio/pages/single.php?noticia=14528>

Hongos fitopatógenos

Bacterias fitopatógenas

Las bacterias también son otros de los microorganismos fitopatógenos causantes de enfermedades. Diversos géneros de este grupo de microorganismos han puesto a prueba la paciencia de agricultores, entre estas se pueden mencionar los géneros de Burkholderia, Acidovorax, Streptomyces, Xylella, Spiroplasma, Phytoplasma, Clavibacter, Xanthomonas, Erwinia, Pectobacterium, Pantoea, Agrobacterium, Pseudomonas y Ralstonia (Hernández, 2023). Citando un ejemplo de estas bacterias fitopatógenas encontramos a *Erwinia amylovora*, enemiga declarada de importantes cultivos como manzana, pera, moras y frambuesas, por mencionar algunas (Piqué et al., 2015) y cuyos síntomas son necrosis en flores, ramas, hojas y frutos, quedando al final un aspecto de “quemado”, característica que deriva en el nombre de fuego bacteriano a esta enfermedad (Zeng et al., 2021). Por su parte, *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* y *C. michiganensis* subsp. *capsici* son bacterias que causan “cáncer bacteriano” en tomate y pimientos, respectivamente. En donde se pueden observar diferentes síntomas en frutos, hojas y tallos en forma de manchas, los cuales se marchitan, se vuelven blancos o marrones, debido a que el microorganismo ataca el tejido vascular y al tejido parenquimatosos de la

Los hongos fitopatógenos también se pueden considerar dentro de los grupos más peligrosos para los cultivos. Entre algunos de los géneros fúngicos responsables de estos daños se pueden mencionar a *Fusarium oxysporum*, *Botrytis cinerea*, *Blumeria graminis*, *Mycosphaella graminicola*, *Colletotrichum* spp., *Ustilago maydis* (Lucas-Bautista et al., 2022). *Fusarium oxysporum* es el responsable de marchitamiento en zarzamora y tomate (Corral Melgoza et al., 2024; Carmona et al., 2020), por su parte *Botrytis cinerea* uno de los hongos que ha sido muy estudiado debido a su alto grado de patogenicidad, ya que es necrotrófico y ataca tejido suave como frutas, vegetales y flores, la cual incluye a una larga lista de especies vegetales en donde podemos destacar a los cultivos de la fresa, tomate, cebolla, cítricos, entre otros (Bi et al., 2023).

Uno de los cultivos que son afectados por hongos fitopatógenos son los cítricos. Dentro de las principales enfermedades que presentan los cítricos se encuentra la gomosis, que, como su nombre lo indica, es la formación de una sustancia gomosa en los tallos de la planta; además, causa clorosis, que es amarillamiento y posterior muerte de ramas y hojas, flores y frutos, y es generado por un hongo llamado *Phytophthora* spp. (Sáenz-Pérez et al., 2020).

Como se puede observar, las diferentes enfermedades causadas por estos fitopatógenos conllevan enormes pérdidas de los cultivos a los que afectan, lo que es negativo para este sector productivo y, por ende, para nosotros los consumidores. Y no es que los agricultores y productores se queden con los brazos cruzados al tener que enfrentar estas plagas. Siempre se ha contado con remedios para combatir estos contratiempos, los cuales han evolucionado a ser un poco más amigables con el medioambiente. Es en este rubro en el que las plantas toman protagonismo.

Plantas, más que verdor y oxígeno

A lo largo de la historia, las plantas han jugado un papel fundamental en el desarrollo y evolución del ser humano. En principio, porque son fuente de alimento, pero también debido a que han sido utilizadas para un sinnúmero de aplicaciones al utilizarlas como material para la construcción de casas, en ornamentación, como fuentes de fibras textiles, remedios para diferentes enfermedades, entre muchos otros usos (Palomo-Ligas et al., 2022). Por su parte, las plantas también han tenido su propia evolución a través del desarrollo de su capacidad de adaptarse y protegerse del medio en donde han crecido, muchas veces en condiciones adversas, ya sea por el déficit de agua o de algún nutriente, o bien para la defensa contra diversos depredadores. Estas adaptaciones las podemos traducir como la síntesis de diversas moléculas como polifenoles, flavonoides o ácidos fenólicos, las cuales han tomado relevancia en los últimos años debido a sus características bioactivas que han sido evaluadas en diferentes ámbitos como en la medicina, en la industria de los alimentos y en la agrícola (Stiller et al., 2021).

Hay una larga lista de plantas cuyas propiedades se han descrito y probado a través del tiempo. En el desierto chihuahuense existe una planta llamada gobernadora (*Larrea tridentata*) (Figura 3), popular entre los habitantes de dicha región por sus diferentes usos, pero

también de gran interés para la ciencia y la agricultura como fuente de moléculas como polifenoles, terpenos, alcaloides y saponinas que actúan contra fitopatógenos de interés como *Aspergillus flavus* y *Penicillium* sp (López-Romero et al., 2023).



Figura 3. Algunas plantas que son ricas en compuestos bioactivos. a) Hojasen (*Flourensia cernua*); b) Gobernadora (*Larrea tridentata*), fotografía obtenida del portal de imágenes de la Universidad Autónoma de Coahuila <http://www.uadec.mx/gobernadora/>

Colletotrichum gloeosporioides, hongo que ataca a la papaya, entre otros cultivos, ha sido evaluado en cuanto a la inhibición en crecimiento en pruebas in vitro contra extractos vegetales; estas plantas fueron la pulpa del arrayán (*Psidium sartinum*), hojas de *Echeveria kimnachii*, y la pulpa del árbol capulincillo (*Vitex mollis*), encontrando resultados positivos y gran efectividad en la inhibición del crecimiento de este fitopatógeno (López-Velázquez et al., 2021). Aceites esenciales de plantas como tomillo y romero también han sido probados contra hongos fitopatógenos como *Fusarium* spp. y *Alternaria* spp., observando la inhibición en el crecimiento de dichos hongos en pruebas in vitro (Flores-Chacón y Mojica Flórez, 2019). Pero *Alteraria alternata* no solo es proclive a ser inhibido por aceites esenciales; también lo puede hacer poniéndose a prueba con extractos vegetales obtenidos de *Flourensia cernua* o más conocida como hojasen (Figuras 3 y 4).

Y así se pueden mencionar un sinnúmero de otras plantas y sus extractos que han demostrado efectividad contra este tipo de microorganismos, esto gracias a sus mejores armas, los compuestos bioactivos.



Figura 4. Bioensayo de extracto vegetal obtenido de la planta hojaseñ (Flourensia cernua) contra el hongo fitopatógeno *Alternaria alternata*: a) Medio de cultivo PDA con el hongo fitopatógeno (control); b) Medio de cultivo PDA con extracto de hojaseñ 500 ppm. Se puede observar el efecto del extracto en el retraso en el crecimiento del hongo.

Compuestos bioactivos de plantas, moléculas que combaten fitopatógenos

Pero empecemos por definir compuesto bioactivo; esta es una molécula que brinda un efecto positivo o negativo en un organismo. Es decir, estas moléculas tienen la capacidad de beneficiar a un organismo a través de sus características químicas. Por ejemplo, un polifenol que, gracias a su poder antioxidante, combate los radicales libres generados en las células. Esto evita daño celular que potencialmente podría encaminarse a un cáncer (Mora Lóor et al., 2022). Otro aspecto llamativo que se ha descrito sobre este tipo de moléculas es su efecto sobre la inhibición del crecimiento sobre microorganismos patógenos para plantas o fitopatógenos, abriendo la posibilidad de poco a poco descartar el uso de productos comerciales sintéticos como los agroquímicos que tienen efectos negativos en el campo (Kursa et al., 2022).

Los compuestos bioactivos, tales como los polifenoles y terpenos, han sido ampliamente estudiados y se ha descubierto que tienen un potencial enorme en el área de la agricultura, puesto que varios de ellos presentan actividad antimicrobiana, es decir, que pueden atacar diversos microorganismos fitopatógenos (Choudhary et al., 2021). Esto tiene una importancia enorme, puesto que en la actualidad se están buscando alternativas amigables con el medioambiente, ya que las alternativas actuales y más usadas representan un riesgo para la salud humana y del medioambiente.

Son muchas las moléculas bioactivas que

han sido evaluadas, citaremos algunos ejemplos. Como tal, ninguna molécula actúa por sí sola, más bien actúan en conjunto y están presentes en los diferentes extractos vegetales, que en términos prácticos es la porción de la planta que contiene estas moléculas bioactivas, algo así como el concentrado. Este extracto es puesto a prueba contra los fitopatógenos en condiciones de laboratorio o invernadero para probar su efectividad. A la par, se hace una cuantificación sobre qué moléculas están en este extracto. Algunos ejemplos de compuestos que han mostrado un gran efecto antimicrobiano son las quercetinas, catequinas, antocianinas, flavones, ácido elágico, ácidos hidroxycinámicos, curcuminoides, tirosol, dihidrocalconas y ácido gálico, entre otros (Figura 5) (Rosas Jauregui et al., 2021).



Figura 5. Algunas moléculas bioactivas encontradas en diferentes extractos vegetales con actividad antimicrobiana.

Futuro de la agricultura y el combate de fitopatógenos

En cualquier ámbito de hoy en día se buscan soluciones más amigables con el medioambiente y cuya obtención vaya de la mano con tecnologías emergentes. La forma de obtención de extractos vegetales ha ido evolucionando con el tiempo, desde metodologías rudimentarias en donde se utilizan solventes orgánicos y equipos como el Soxhlet, hasta el uso de metodologías como el ultrasonido y microondas; así como también se ha hecho uso de la biotecnología.

Una de las características que destaca en el uso de la biotecnología aplicada a extractos vegetales es que, a través de la fermentación de los mismos, aumenta la biodisponibilidad de diversas moléculas. Los compuestos bioactivos presentes naturalmente en las plantas generalmente se encuentran en forma ligada y menos biodisponibles que la forma libre. La fermentación es un bioproceso o método en donde los microorganismos son capaces de modificar los constituyentes de las plantas mediante la liberación de los enlaces químicos. Por lo tanto, tras este proceso los componentes quedan libres y de esta forma más disponibles para ser aprovechados (Yeo y Ewe, 2015). Y es aquí en donde microorganismos tales como *Aspergillus niger* y *Aspergillus awamori* han sido probados para llevar a cabo dicha tarea, brindando resultados positivos y una mejora en la bioactividad de los extractos de diferentes plantas, mejorando así las diversas características antioxidantes y antimicrobianas de los extractos y, por ende, su potencial uso como ingrediente en las formulaciones de biopesticidas (Zhao et al., 2021).

Géneros fúngicos como *Trichoderma*, *Penicillium* y *Aspergillus* son conocidos como agentes de control biológico debido a su capacidad de contrarrestar fitopatógenos de forma directa y además son incluidos en productos comerciales biopesticidas, gracias a la protección que ejercen al cultivo, promoviendo que cada vez se utilicen menos agentes químicos en dichas formulaciones (García-Latorre et al., 2022). Pero no solo los hongos se pueden

considerar como agentes de control biológico; también se incluye en esta selecta lista a bacterias, virus, nematodos e insectos, los cuales pueden trabajar incluso en conjunto para mejores resultados, ya que actúan como lo hace la microbiota del intestino del ser humano, protegiendo contra microorganismos patógenos, produciendo metabolitos benéficos y poblando la rizosfera, evitando de esta manera el crecimiento y la proliferación de fitopatógenos (Niu et al., 2020).

Conclusiones

Es evidente que los esfuerzos a lo largo del tiempo por encontrar alternativas ecológicas para su uso en la agricultura, basados en extractos de plantas como ingrediente principal y útil en las fórmulas de los nuevos biopesticidas, contribuyen a lograr una agricultura más sostenible. Esta tendencia solamente es el inicio de este camino que los científicos y agricultores van creando y en el cual se estará trabajando para tener una agricultura más verde, eficaz y autosostenible, la misma que beneficiaría al campo y a los consumidores alrededor de nuestro planeta.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Se agradece al CONACYT por el apoyo otorgado para la realización de la estancia posdoctoral dentro del programa Estancias Posdoctorales por México, a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y a la Universidad Autónoma de Coahuila.

Referencias

- Bi, K., Liang, Y., Mengiste, T., & Sharon, A. (2023). Killing softly: a roadmap of *Botrytis cinerea* pathogenicity. *Trends in Plant Science*, 28(2), 211-222. [10.1016/j.tplants.2022.08.024](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.08.024)
- Carmona, S. L., Villarreal-Navarrete, A., Burbano-David, D., & Soto-Suárez, M. (2020). Cambios fisiológicos y mecanismos genéticos asociados a la marchitez vascular causada por *Fusarium* en tomate: una revisión actualizada. *Temas Agrarios*, 25(2), 166-189. <https://doi.org/10.21897/rta.v25i2.2457>
- Choudhary, P., Aggarwal, P.R., Rana, S., Nagarathnam, R., & Muthamilarasan, M. (2021). Molecular and metabolomic interventions for identifying potential bioactive molecules to mitigate diseases and their impacts on crop plants. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 114, 101624. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101624>
- Corral Melgoza, J.J., García-Saucedo, P.A., Aguirre-Paleo, S., Vargas-Sandoval, M., Guzmán-de Casa, A., & Ávila-Val, T.C. (2024). Microorganismos Antagonistas Como Manejo Del Marchitamiento De La Zarzamora Por *Fusarium Oxysporum*. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 15 (3). ME:e3655. <https://doi.org/10.29312/remexa.v15i3.3655>.
- Flórez Chacón, C., & Mojica Flórez, J. (2019). Determinación de la composición química de los aceites esenciales de Tomillo (*Thymus vulgaris*) y Romero (*Rosmarinus officinalis*) y su posible uso como antifúngico contra microorganismos fitopatógenos en productos agrícolas. *Pregrado. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca*.
- Hernández, Y. (2023). Bacterias causantes de enfermedades en cultivos de interés agrícola en Venezuela. *Revista De La Facultad De Agronomía*, 1(76), 133. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/25605
- Kursa, W., Jamiołkowska, A., Skwaryło-Bednarz, B., Kowalski, R., Wrosteck, J., Patkowska, E., & Kopacki, M. (2022). In vitro efficacy of herbal plant extracts on some phytopathogenic fungi. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 21(6), 79-90. <https://doi.org/10.24326/asphc.2022.6.7>
- López-Romero, J.C., Torres-Moreno, H., Rodríguez-Martínez, K.L., del Carmen Suárez-García, A., Beltrán-Martínez, M.E., & García-Dávila, J. (2023). Larrea Tridentate: Bioactive Compounds, Biological Activities and Its Potential Use in Phytopharmaceuticals Improvement. In *Aromatic and Medicinal Plants of Drylands and Deserts: Ecology, Ethnobiology and Potential Uses* (pp. 231-268). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003251255-11>
- López-Velázquez, J.G., Delgado-Vargas, F., Ayón-Reyna, L.E., López-Angulo, G., Bautista-Baños, S., Uriarte-Gastelum, Y.G., López-

López, M.E., & Vega-García, M. O. (2021). Postharvest application of partitioned plant extracts from Sinaloa, Mexico for controlling papaya pathogenic fungus *Colletotrichum gloeosporioides*. *Journal of Plant Pathology*, 103(3), 831–842. 10.1007/s42161-021-00838-w

Lucas-Bautista, J.A., Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R.I., & Hernández-López, Mónica. (2022). Quitinasas en plantas y posible uso como biomarcadores para el diseño de biosensores en la detección de hongos fitopatógenos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(4), 701-713. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i4.2717>

Mora Loo, J.L., Cabrera Casillas, D.O., Alarcón Mite, A.I., & García Larreta, F.S. (2022). Estudio comparativo de polifenoles o fenoles totales y actividad antioxidante de la cascara citrus sínensis. *RECIAMUC*, 6(3), 459-469. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.\(3\).julio.2022.459-469](https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.(3).julio.2022.459-469)

Niu, B., Wang, W., Yuan, Z., Sederoff, R.R., Sederoff, H., Chiang, V.L. & Borriss, R. (2020) Microbial Interactions Within Multiple-Strain Biological Control Agents Impact Soil-Borne Plant Disease. *Frontiers in Microbiology*, 11:585404. 10.3389/fmicb.2020.585404

Omran, B.A., Rabbee, M.F., & Baek, K.H. (2024) Biologically inspired nanoformulations for the control of bacterial canker pathogens *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* and subsp. *capsici*. *Journal of Biotechnology*, 392, 34-47. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2024.06.017>

Palacios, M.F., Figueroa, J., Foguet, L., Villafañe, L., & Stein, B. (2020). Estudio de la población del virus de la tristeza de los cítricos en cultivares de limoneros injertados en naranjo agrio y *Citrus macrophylla*. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 97(1), 27-33. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30182020000100004&lng=es&tlng=es.

Palomo-Ligas, L., Nery-Flores, S.D., García-Ortíz, J.D., Pérez-Juárez, C.M., Ascacio-Valdes, J.A., Flores-Gallegos, A.C., Rodríguez-Herrera, R., & Cruz-Requena, M. (2022). Molecular effects of bioactive compounds from semi desert plant and their use as potential ingredient in food products. In *Functional Foods and Molecular Mechanisms: Frontier Between Health and Disease*. (pp 142-192). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119804055.ch6>

Piqué, N., Miñana-Galbis, D., Merino, S., & Tomás J.M. (2015). Virulence Factors of *Erwinia amylovora*: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(6):12836-12854. <https://doi.org/10.3390/ijms160612836>

Pontes, J.G.M., Fernandes, L.S., dos Santos, R.V., Tasic, L., & Fill, T. (2020). Virulence Factors in the Phytopathogen-Host Interactions: An Overview. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(29), 7555-7570. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02389>

Rodrigo S., García-Latorre C, Santamaria O. (2022). Metabolites Produced by Fungi against Fungal Phytopathogens: Review,

- Rosas Jauregui, I.A., Hernández Castillo, F.D., Palomo Ligas, L., Martínez Alemán, S.R., Ascacio Valdés, J.A., & Rodríguez Herrera, R. (2021). Polyphenols from different plant sources and their in vitro effect against chickpea pathogens. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(8), 1415-1427. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2742>
- Saad N., Olmstead, J.W., Jones, J.B., Varsani, A., & Harmon, P.F. (2021). Known and New Emerging Viruses Infecting Blueberry. *Plants*, 10(10), 2172. <https://doi.org/10.3390/plants10102172>
- Sáenz Pérez, C.A., Osorio-Hernández, E., Estrada Drouaillet, B., Poot Poot, W.A., Delgado Martínez, R., & Rodríguez-Herrera, R. (2019). Principales enfermedades en cítricos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(7), 1653-1665. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i7.1827>
- Stiller, A., Garrison, K., Gurdyumov, K., Kenner, J., Yasmin, F., Yates, P., & Song, B.H. (2021). From Fighting Critters to Saving Lives: Polyphenols in Plant Defense and Human Health. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 8995. <https://doi.org/10.3390/ijms22168995>
- Yeo, S.K., & Ewe, J.A. (2015). Effect of fermentation on the phytochemical contents and antioxidant properties of plant foods. In *Advances in Fermented Foods and Beverages*, (pp 107-122). Science Direct. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-015-6.00005-0>
- Zeng, Q., Puławska, J., & Schachterle, J. (2021). Early events in fire blight infection and pathogenesis of *Erwinia amylovora*. *Journal of Plant Pathology*, 103 (Suppl 1), 13–24. <https://doi.org/10.1007/s42161-020-00675-3>
- Zhao, Y.S., Eweys, A.S., Zhang, J.Y., Zhu, Y., Bai, J., Darwesh, O.M., Zhang, H.B., & Xiao, X. (2021). Fermentation Affects the Antioxidant Activity of Plant-Based Food Material through the Release and Production of Bioactive Components. *Antioxidants*, 10(12), 2004. <https://doi.org/10.3390/antiox10122004>

DIETA CETOGENICA UNA OPCION SALUDABLE O SOLO UNA MODA?

KETOGENIC DIET: A HEALTHY OPTION OR JUST A FAD?

Verna Cázares-Ordoñez, (1) Ramiro José González Duarte, (2) Sandra Prado Ordoñez, (2) Diana Monserrat Zamora Andrade, (3) Schari Ali Almanza Santiago, (4) José Manuel Alonso Mora.

Centro Universitario de la Salud, Complejo Regional Nororiental, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Arias y Blvd. s/n, El Carmen, C.P. 73800, Teziutlán, Puebla. (1) Docente e investigador, (2) Estudiante de Nutrición Clínica, (3) Estudiante de Medicina General y Comunitaria.

Bachillerato Tecnológico Agropecuario sede Ixtepec del Complejo Regional Nororiental de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (4) Docente e investigador.

*Autor de correspondencia: verna.cazares@correo.buap.mx
ramiro.gonzalezd@correo.buap.mx
sandra.pradoo@alumno.buap.mx
diana.zamora@alumno.buap.mx
schari.almanza@alumno.buap.mx
manuel.alonsomora@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3564-0369>
<https://orcid.org/0000-0002-6041-9888>
<https://orcid.org/0009-0006-0213-2201>
<https://orcid.org/0009-0003-1207-1033>
<https://orcid.org/0009-0005-4273-084X>
<https://orcid.org/0009-0002-9856-181X>

Resumen

La dieta cetogénica, o "keto," es un plan de alimentación bajo en carbohidratos y alto en grasas que cambia la fuente de energía del cuerpo de la glucosa a la grasa mediante un estado metabólico llamado cetosis. Desarrollada en la década de 1920 para tratar la epilepsia, esta dieta se ha popularizado por sus posibles beneficios en la pérdida de peso, el manejo de la diabetes y algunas condiciones neurológicas. Sin embargo, no es ideal para todos, especialmente para adolescentes, ya que sus restricciones pueden llevar a deficiencias nutricionales. Aunque algunos deportistas pueden beneficiarse de la mayor oxidación de grasa para deportes de resistencia, el entrenamiento de alta intensidad generalmente requiere carbohidratos. La dieta cetogénica puede ser útil bajo supervisión médica, pero debe adoptarse con cautela. En última instancia, una dieta balanceada y un estilo de vida activo son esenciales para una salud a largo plazo.

Palabras clave: Dieta cetogénica, carbohidratos, metabolismo, pérdida de peso, deporte.

Abstract

The ketogenic diet, or "keto," is a low-carbohydrate, high-fat eating plan that shifts the body's energy source from glucose to fat by inducing a metabolic state called ketosis. Originally developed in the 1920s to treat epilepsy, this diet has gained popularity for its potential benefits in weight loss, diabetes management, and certain neurological conditions. However, the ketogenic diet isn't ideal for everyone, especially teenagers, as it can lead to nutrient deficiencies due to its restrictions. While some athletes may benefit from increased fat oxidation for endurance sports, high-intensity training typically requires carbohydrates for optimal performance. The ketogenic diet can be a powerful tool under medical supervision but should be approached cautiously. Ultimately, a balanced diet combined with an active lifestyle is essential for long-term health.

Keywords: Ketogenic diet, carbohydrates, metabolism, weight loss, sports.

Introducción a la dieta cetogénica

La dieta cetogénica, también conocida como "keto", es un tipo de alimentación que ha ganado popularidad en los últimos años entre quienes buscan perder peso, mejorar su salud o aumentar su rendimiento físico. Esta dieta se basa en consumir muy pocos carbohidratos y una alta cantidad de grasas, llevando al cuerpo a un estado llamado cetosis (figura 1). En este estado, el cuerpo utiliza la grasa como principal fuente de energía en lugar de los carbohidratos. Aunque parece una dieta prometedora, es importante conocer en profundidad cómo funciona, sus posibles beneficios y riesgos, y para quién es realmente adecuada.

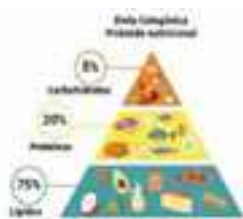


Figura 1. La pirámide nutricional de la dieta cetogénica muestra la distribución de macronutrientes recomendada para esta alimentación baja en carbohidratos, con un enfoque en un alto consumo de grasas saludables (75%), una cantidad moderada de proteínas (20%) y una mínima ingesta de carbohidratos (5%).

Historia de la dieta cetogénica

Aunque parece una moda reciente, la dieta cetogénica tiene una historia de más de un siglo. En la década de 1920, el médico estadounidense Dr. Russell Wilder introdujo esta dieta como un tratamiento para la epilepsia, especialmente en niños que no respondían bien a los medicamentos. Wilder observó que al reducir los carbohidratos y aumentar las grasas en la alimentación, se lograba inducir cetosis y reducir la frecuencia de las convulsiones. La dieta fue ampliamente utilizada en clínicas

y hospitales durante décadas como una alternativa a los medicamentos anticonvulsivos, especialmente para niños con epilepsia refractaria (Kim JM, 2017). Con el tiempo, la dieta cetogénica perdió popularidad debido a la aparición de nuevos tratamientos y medicamentos. Sin embargo, en los años 1970 y 1980, el interés en esta dieta resurgió gracias a estudios que investigaban su impacto en la salud metabólica, especialmente en el manejo del peso y la diabetes tipo 2. Hoy en día, la dieta cetogénica es popular no solo en el ámbito médico, sino también en el mundo del fitness y la salud general, con personas que la siguen por razones estéticas o de rendimiento físico.

¿Cómo funciona La dieta cetogénica?

Para entender cómo funciona la dieta cetogénica, primero hay que comprender cómo el cuerpo obtiene y utiliza la energía. En condiciones normales, nuestro cuerpo obtiene los carbohidratos de los alimentos que consumimos, como pan, pasta, arroz, frutas y verduras. Estos carbohidratos, que pueden presentarse en diversas formas como azúcares simples (glucosa, fructosa) o carbohidratos complejos (almidón), son digeridos liberando glucosa. Esta glucosa es esencial para que las células realicen sus funciones, ya que una vez que la glucosa entra en ellas, se somete a un proceso llamado glucólisis, donde se convierte en ATP (adenosín trifosfato), una molécula que proporciona la energía necesaria para llevar a cabo todas las actividades celulares, desde mover un músculo hasta funciones cognitivas (Nelson, D. L., & Cox, M. M. 2009). Por tanto, los carbohidratos de la dieta son esenciales para que las células puedan obtener energía de forma rápida y eficiente. La dieta cetogénica limita esta fuente de energía rápida, forzando al cuerpo a usar sus reservas de grasa (figura 2). Este cambio en la fuente de energía provoca una serie de adaptaciones metabólicas en el organismo, y es aquí donde entra en juego la cetosis.



Figura 2. Adaptación de un plato del bien comer con 50% carbohidratos, 25% proteínas y 25% frutas y verduras a un plato del bien comer con la dieta Keto 75% lípidos, 20% proteínas y 5% carbohidratos.

¿Qué es la cetosis?

La cetosis es un estado metabólico que ocurre cuando el cuerpo utiliza la grasa para obtener energía en lugar de glucosa. Al disminuir los niveles de glucosa en sangre, aumenta la secreción de glucagón. Esta hormona estimula la lipólisis activando la lipasa sensible a hormonas en el tejido adiposo, lo que facilita la liberación de ácidos grasos hacia el hígado para la cetogénesis donde se degradan mediante beta-oxidación para generar acetil-CoA entonces el exceso de acetil-CoA se convierte en cuerpos cetónicos: acetoacetato, beta-hidroxibutirato y acetona.

La producción de cuerpos cetónicos depende de factores como el metabolismo basal (BMR), el índice de masa corporal (IMC) y el porcentaje de grasa corporal. Estos cuerpos cetónicos, denominados "super combustible," son más eficientes que la glucosa en términos de producción de energía, ya que 100 gramos de acetoacetato producen aproximadamente 9,400 gramos de ATP, mientras que el beta-hidroxibutirato genera 10,500 gramos de ATP, en comparación con los 8,700 gramos que produce la misma cantidad de glucosa (Dhillon KK, Gupta S. 2023). La cetosis permite al organismo mantener una producción energética constante y eficiente incluso en situaciones de déficit calórico, además de reducir el daño causado por los radicales libres y mejorar la capacidad antioxidante del cuerpo (Mooli, R. G. R., & Ramakrishnan, S. K. 2022).

Una vez producidos, los cuerpos cetóni-

cos se liberan en el torrente sanguíneo y son utilizados como fuente alternativa de energía por órganos como el cerebro, el corazón y los músculos (figura 3). Aunque el cerebro suele utilizar la glucosa como su fuente principal de energía, en un estado de cetosis puede obtener hasta un 75% de su energía de los cuerpos cetónicos, lo que permite al organismo funcionar adecuadamente cuando la disponibilidad de carbohidratos es baja (Volek & Phinney, 2009).

La cetosis es un estado que históricamente ha permitido a los humanos sobrevivir durante períodos de hambre, cuando no había disponibilidad de carbohidratos. Hoy en día, la cetosis se induce intencionalmente a través de la dieta cetogénica con el propósito de quemar grasa y lograr otros efectos metabólicos. Sin embargo, no todas las personas experimentan cetosis de la misma manera, ya que factores como el metabolismo, el peso corporal y la genética afectan la producción de cuerpos cetónicos (Dhillon KK, Gupta S, 2023).

Tipos de dietas cetogénicas

Existen cuatro tipos de dietas cetogénicas, clasificadas según el porcentaje de macronutrientes que contienen, lo cual facilita su adherencia. Estos tipos son: la dieta cetogénica clásica de triglicéridos de cadena larga (LCT) con ácidos grasos de 12 o más carbonos). La dieta cetogénica de triglicéridos de cadena media (MCT) con ácidos grasos de hasta 10 carbonos. La dieta Atkins modificada (MAD) es baja en carbohidratos, alta en grasas y moderada en proteínas; imita el ayuno para inducir la cetosis. El tratamiento de bajo índice glucémico (LGIT) está basado en consumir alimentos con bajo índice glucémico, que se digieren y metabolizan más lentamente, provocando menos fluctuaciones en los niveles de glucosa en sangre (Mooli, R. G. R., & Ramakrishnan, S. K. 2022).

Beneficios potenciales de la dieta cetogénica

La dieta cetogénica ha demostrado beneficios en varias enfermedades debido a sus efectos sobre el metabolismo y las hormonas. Originalmente diseñada para tratar la epilepsia, esta dieta ha mostrado una eficacia notable en el control de convulsiones, especialmente en pacientes que no responden bien a los medicamentos antiepilépticos (Williams, T. J. & Cervenka, M. C. 2017). Un estudio en pacientes epilépticos reveló que hasta el 52% de los que siguieron la dieta cetogénica clásica experimentaron una reducción de al menos el 50% en la frecuencia de sus convulsiones (D'Andrea Meira et al., 2019; Williams & Cervenka, 2017).

Además de su aplicación en la epilepsia, la dieta cetogénica ha sido explorada en otras condiciones de salud. En pacientes con diabetes tipo 2, la dieta mejora la sensibilidad a la insulina y el control de la glucosa, especialmente en personas con obesidad, donde contribuye tanto a la pérdida de peso como a la regulación de los niveles de glucosa en sangre (Boden et al., 2005). También se ha propuesto como tratamiento complementario en ciertas terapias contra el cáncer, ya que la cetosis podría inhibir el crecimiento de células tumorales al limitar el suministro de glucosa necesario para su desarrollo (Erickson et al., 2017).

En cuanto a enfermedades neurológicas, la dieta cetogénica ha mostrado potencial para el manejo de trastornos neurodegenerativos, como el Alzheimer y algunas enfermedades mitocondriales, ya que los cuerpos cetónicos pueden actuar como fuente alternativa de energía para el cerebro, lo que ayuda a reducir el estrés oxidativo y mejora la función mitocondrial (Tabaie et al., 2021; Barrea et al., 2022; Alhamzah et al., 2023).

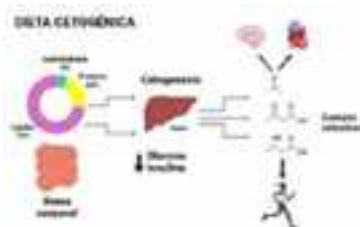


Figura 3. Esquema del proceso de cetogénesis en la dieta cetogénica. Con una alta ingesta de lípidos (75%), proteínas moderadas (20%) y carbohidratos mínimos (5%), el hígado convierte las grasas en cuerpos cetónicos que sirven como fuente de energía alternativa para el cerebro, el corazón y los músculos, reduciendo los niveles de glucosa e insulina en el cuerpo y mejorando el rendimiento físico.

Dieta cetogénica pérdida de peso

La dieta cetogénica ha ganado popularidad como un método de pérdida de peso. Esta dieta, caracterizada por una ingesta baja en carbohidratos y alta en grasas, favorece una menor ingesta calórica y una mayor oxidación de grasas, lo que puede ser particularmente beneficioso para personas con resistencia a la insulina o problemas de glucemia. A corto plazo, los estudios muestran que la dieta cetogénica puede inducir una pérdida de peso inicial más rápida en comparación con dietas bajas en grasa, alcanzando una reducción promedio de hasta 2 kg adicionales en un periodo de un año.

Sin embargo, esta efectividad tiende a estabilizarse después de los primeros cinco meses, y el peso puede recuperarse gradualmente. Además, el impacto varía significativamente entre individuos: algunas personas pueden perder hasta 30 kg, mientras que otras pueden no experimentar grandes cambios o incluso pueden ganar peso (Ting, R. et al., 2018). Lamentablemente, no existen estudios a largo plazo que sigan a los pacientes y documenten los efectos de la dieta cetogénica en la adaptación metabólica. Por otro lado, ensayos clínicos que han evaluado el papel de la dieta cetogénica sobre el peso y la composición corporal mostraron que los pacientes que siguieron una dieta cetogénica muy baja en carbohidratos, en comparación con aquellos que

realizaron una dieta baja en carbohidratos, presentaron una mayor reducción de peso corporal, circunferencia de cintura y masa grasa. No se observaron cambios medibles en la masa libre de grasa (Varga, S. et al., 2018). Esto sugiere que la dieta cetogénica puede contribuir a conservar la masa magra.

Estas observaciones también se han hecho en estudios en modelos animales donde el consumo prolongado de una dieta cetogénica sin restricciones calóricas puede llevar a un aumento de masa grasa y problemas metabólicos, como intolerancia a la glucosa (Goldberg, E. L. 2020). Estos hallazgos subrayan la necesidad de adoptar la dieta cetogénica con precaución, ajustando su duración y composición según las características y objetivos individuales, para maximizar sus beneficios y minimizar posibles riesgos a largo plazo en el control del peso.

Limitaciones de la dieta cetogénica a largo plazo

La dieta cetogénica se ha popularizado como una herramienta eficaz para la pérdida de peso a corto plazo, ya que induce un estado de cetosis en el que el cuerpo utiliza las reservas de grasa como fuente principal de energía. Sin embargo, mantener esta dieta a largo plazo no siempre garantiza el éxito en la pérdida de peso, y esto se debe a cómo el cuerpo se adapta a este tipo de alimentación.

Cuando se pierde peso, el organismo reduce el gasto energético en reposo o metabolismo basal, ya que necesita menos energía para sostener un peso corporal más bajo. En el caso de la dieta cetogénica, esta disminución puede ser aún mayor debido a la "adaptación metabólica", un fenómeno en el que el cuerpo se vuelve más eficiente para conservar energía, como si intentara protegerse ante una posible falta de alimento (Basolo, A. et al., 2022).

Además de esta reducción en el gasto energético, la dieta cetogénica a largo plazo puede desencadenar un aumento en las señales de apetito. Hormonas clave

en la regulación del hambre, como la leptina y la grelina, cambian sus niveles en respuesta a la pérdida de peso: la leptina (hormona que reduce el apetito) disminuye, mientras que la grelina (la "hormona del hambre") aumenta, estimulando el apetito. Esto genera en el organismo una necesidad de consumir más alimentos, haciendo que sea difícil mantener el peso perdido y aumentando el riesgo de que las personas vuelvan a ganar peso (Paoli, A., et al., 2023).

En conjunto, estos mecanismos –la reducción del gasto energético y el incremento en el apetito– hacen que muchas personas experimenten una estabilización o incluso una recuperación de peso tras seguir la dieta cetogénica por periodos prolongados. Estos desafíos resaltan la importancia de considerar la dieta cetogénica con precaución y de buscar un enfoque equilibrado que facilite mantener el peso perdido a largo plazo.

Dieta cetogénica y deporte

La dieta cetogénica se ha vuelto popular en el mundo del deporte y entre quienes buscan mejorar su salud, especialmente por su capacidad para reducir grasa corporal. A diferencia de las dietas extremadamente bajas en calorías, la dieta cetogénica aporta suficiente energía y proteínas, evitando problemas de desnutrición.

En los deportistas las dietas cetogénicas puede ayudar a mantener el peso y aumentar la resistencia, ya que las grasas proporcionan una fuente de energía duradera para actividades de baja intensidad y larga duración. La dieta cetogénica limita mucho el consumo de carbohidratos, lo cual activa procesos en el cuerpo parecidos a los del ayuno, como la autofagia (una limpieza celular) y la resistencia al estrés. Estas reacciones ocurren porque la dieta cetogénica activa unas proteínas especiales en las células, como la AMPK y SIRT-1, que ayudan al cuerpo a quemar grasas como fuente principal de energía (Zhang, S. et al., 2022). Esto es positivo para la resistencia y el uso eficiente de energía sin embargo, para aquellos interesados en ganar masa muscular, la dieta

cetogénica podría no ser la opción ideal. La construcción de músculo depende en gran medida de una molécula llamada IGF-1, que se activa principalmente cuando se consumen carbohidratos (Yoshida, T. & Delafontaine, P., 2020). Este proceso desencadena una serie de señales que estimulan el crecimiento y fortalecimiento muscular, especialmente después de realizar ejercicios de fuerza (Fink, J. et al., 2018). Sin embargo, en una dieta cetogénica, la señal de IGF-1 se reduce, lo que puede dificultar la ganancia de masa muscular (Nakao, R. et al., 2019). Un estudio reciente investigó cómo la dieta cetogénica afecta a los culturistas naturales (sin uso de esteroides ni otras ayudas químicas).

Para esto, se asignaron a dos grupos: uno siguió la dieta cetogénica y otro una dieta occidental típica. Después de dos meses, ambos grupos mostraron mejoría en la fuerza muscular, pero solo el grupo de la dieta occidental (con carbohidratos incluidos) logró aumentar significativamente su masa muscular. En contraste, el grupo de dieta cetogénica perdió grasa corporal, pero no consiguió el mismo aumento de masa magra. Por otro lado, el estudio mostró algunos beneficios interesantes de la dieta cetogénica. Los participantes que la siguieron redujeron significativamente sus niveles de triglicéridos, glucosa e insulina, y también mostraron una disminución de sustancias inflamatorias en su cuerpo.

Además, en ambos grupos se observó un aumento de factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF), una proteína que beneficia el cerebro al desempeñar un papel importante en el crecimiento, supervivencia y diferenciación de las neuronas en el sistema nervioso central y periférico. Esta proteína fue mayor en el grupo de la dieta cetogénica (Paoli, A. et al., 2021). Esto sugiere que, aunque la dieta cetogénica puede ser útil para reducir grasa, puede no ser la mejor opción si el objetivo principal es ganar músculo.

En deportes de resistencia, como el ciclismo o el atletismo de larga distancia, la dieta cetogénica ha mostrado resultados más positivos. Al reducir la grasa corporal, los atletas pueden mejorar su rendimiento aeróbico y su resistencia. Un estudio en ciclistas demostró que, después de

adaptarse a la dieta cetogénica, los atletas lograron mantener su rendimiento y aumentaron su capacidad de oxidación de grasas. Este cambio en el metabolismo les permitió utilizar mejor sus reservas de energía y prolongar su rendimiento en competiciones largas. Sin embargo, la adaptación a la dieta cetogénica puede tardar alrededor de una semana, por lo que los deportistas deben planificar su dieta con anticipación a las competencias para evitar una disminución temporal en su rendimiento (Zajac A. et al., 2014).

Aunque la dieta cetogénica tiene beneficios para la pérdida de peso y la resistencia, seguir esta dieta de manera estricta puede ser complicado a largo plazo, especialmente porque limita el consumo de carbohidratos, que son importantes para la recuperación y el crecimiento muscular. Además, cuando se siguen dietas bajas en carbohidratos durante mucho tiempo, el cuerpo puede disminuir su gasto energético en reposo y aumentar las señales de apetito, lo que podría llevar a una estabilización o incluso recuperación de peso. En estudios con atletas de fuerza, aquellos que siguieron una dieta cetogénica experimentaron una menor ganancia de masa muscular en comparación con aquellos que consumieron carbohidratos. Esto se debe a que los carbohidratos no solo proporcionan energía para ejercicios intensos, sino que también ayudan a mejorar la síntesis de proteínas, proceso clave para el crecimiento muscular (Ashtary-Larky, D. et al., 2022).

Un aspecto importante a considerar en la dieta cetogénica es el consumo de proteínas. Para que los deportistas mantengan su masa muscular, es esencial que consuman una cantidad adecuada de proteínas. Estudios sugieren que los deportistas en cetosis deben consumir al menos 1.3 a 1.5 gramos de proteína por kilo de peso corporal al día para evitar la pérdida de masa muscular (Paoli, A., Bianco, A. & Grimaldi, K. A., 2015). Esto se debe a que la cetosis aumenta la necesidad de utilizar proteínas para producir glucosa a través de un proceso llamado gluconeogénesis. Sin embargo, con el aporte adecuado de proteínas, los deportistas pueden mantener su fuerza y, en algunos casos, reducir grasa corporal sin afectar su rendimiento.

La dieta cetogénica puede ser una opción válida para ciertos deportistas, especialmente aquellos que buscan mejorar su resistencia o reducir su porcentaje de grasa corporal sin perder masa muscular. Sin embargo, si el objetivo principal es ganar músculo o realizar ejercicios de alta intensidad, la dieta cetogénica podría no ser la mejor opción, ya que limita la disponibilidad de carbohidratos, necesarios para el crecimiento muscular y la recuperación tras el ejercicio. Además, es esencial que los deportistas en cetosis cuiden su consumo de proteínas y electrolitos para evitar deficiencias nutricionales que podrían afectar su salud y rendimiento.

Efectos secundarios de la dieta cetogénica

Si bien la dieta cetogénica puede tener beneficios, también es importante conocer sus posibles efectos secundarios. La transición hacia la cetosis puede ser difícil para algunas personas, y es común experimentar síntomas conocidos como "gripe cetogénica" durante las primeras semanas. Los efectos secundarios pueden variar de leves a severos y es fundamental conocerlos antes de considerar esta dieta.

La gripe cetogénica

La "gripe cetogénica" es un conjunto de síntomas que algunas personas experimentan al comenzar una dieta cetogénica. Estos síntomas pueden incluir dolor de cabeza, fatiga, náuseas, mareos, irritabilidad y problemas digestivos como estreñimiento o diarrea (Crosby, L. et al., 2021). La gripe cetogénica suele ser temporal y desaparece después de unos días o semanas, una vez que el cuerpo se adapta a la cetosis.

Este malestar ocurre porque el cuerpo está acostumbrado a depender de los carbohidratos como principal fuente de energía. Al cambiar de forma repentina a una dieta baja en carbohidratos, el organismo necesita tiempo para adaptarse a la producción de cuerpos cetónicos y aprender a utilizarlos como fuente de energía (Bostock, E. C. S. et al., 2020).

Estreñimiento y problemas digestivos

La dieta cetogénica reduce la ingesta de alimentos ricos en fibra, como frutas, verduras, legumbres y granos enteros. Esta falta de fibra puede llevar a problemas digestivos, como el estreñimiento, y en algunos casos puede provocar irritación en el sistema digestivo (Masood W. et al., 2023). Además, algunas personas experimentan un desequilibrio en la microbiota intestinal debido a la falta de diversidad en su dieta, lo que puede afectar su salud digestiva a largo plazo (Paoli, A. et al., 2019).

Deficiencias nutricionales

Debido a que la dieta cetogénica excluye varios grupos de alimentos, es posible que las personas no obtengan todas las vitaminas y minerales esenciales. Nutrientes como la vitamina C, el calcio, el magnesio y ciertas vitaminas del grupo B pueden escasear en una dieta cetogénica estricta (Andrewski, E. et al., 2022). Por esta razón, muchas personas que siguen esta dieta optan por tomar suplementos para asegurarse de obtener los nutrientes necesarios y evitar deficiencias.

Conclusiones: ¿Es la dieta cetogénica realmente saludable para todos?

La dieta cetogénica es una herramienta poderosa que, si se usa correctamente, puede tener beneficios en el control de peso, el manejo de la diabetes tipo 2, y como tratamiento complementario en algunos trastornos neurológicos y ciertos tipos de cáncer. Sin embargo, no es una dieta adecuada para todas las personas, y su efectividad depende de varios factores, como el estilo de vida, el nivel de actividad física, los objetivos de salud y la capacidad del individuo para adherirse a esta dieta.

Para personas adultas que buscan perder peso y que pueden mantener un control

adecuado sobre su ingesta de nutrientes, la dieta cetogénica puede ser una opción válida, siempre y cuando se realice bajo supervisión profesional. Sin embargo, para adolescentes y jóvenes en crecimiento, esta dieta podría no ser la mejor opción, ya que puede limitar el acceso a nutrientes esenciales necesarios para un desarrollo saludable.

una dieta cetogénica debe ser cuidadosamente considerada, y siempre es recomendable consultar a un profesional de la salud antes de comenzar. La salud es un equilibrio, y comprender cómo diferentes tipos de alimentos afectan el cuerpo es clave para tomar decisiones informadas sobre la dieta.

En última instancia, la decisión de seguir

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Agradecemos a la BUAP y al Complejo Regional Nororiental por promover e incentivar la investigación y divulgación de la ciencia en estudiantes del Centro Universitario de la Salud.

Referencias

- Alhamzah, S. A., Gatar, O. M., & Alruwaili, N. W. (2023). Effects of ketogenic diet on oxidative stress and cancer: A literature review. *Advances In Cancer Biology - Metastasis*, 7, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.adcanc.2023.100093>
- Andrewski, E., Cheng, K., & Vanderpool, C. (2022). Nutritional Deficiencies in Vegetarian, Gluten-Free, and Ketogenic Diets. *Pediatrics in review*, 43(2), 61–70. <https://doi.org/10.1542/pir.2020-004275>
- Ashtary-Larky, D., Bagheri, R., Bavi, H., Baker, J. S., Moro, T., Mancin, L., & Paoli, A. (2022). Ketogenic diets, physical activity and body composition: a review. *The British journal of nutrition*, 127(12), 1898–1920. <https://doi.org/10.1017/S0007114521002609>
- Basolo, A., Magno, S., Santini, F., & Ceccarini, G. (2022). Ketogenic Diet and Weight Loss: Is There an Effect on Energy Expenditure?. *Nutrients*, 14(9), 1814. <https://doi.org/10.3390/nu14091814>
- Boden, G., Sargrad, K., Homko, C., Mozzoli, M., & Stein, T. P. (2005). Effect of a low-carbohydrate diet on appetite, blood glucose levels, and insulin resistance in obese patients with type 2 diabetes. *Annals of internal medicine*, 142(6), 403–411. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-142-6-200503150-00006>
- Bostock, E. C. S., Kirkby, K. C., Taylor, B. V., & Hawrelak, J. A. (2020). Consumer Reports of "Keto Flu" Associated With the Ketogenic Diet. *Frontiers in nutrition*, 7, 20. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00020>
- Crosby, L., Davis, B., Joshi, S., Jardine, M., Paul, J., Neola, M., & Barnard, N. D. (2021). Ketogenic Diets and Chronic Disease: Weighing the Benefits Against the Risks. *Frontiers in nutrition*, 8, 702802. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.702802>
- Kim J. M. (2017). Ketogenic diet: Old treatment, new beginning. *Clinical neurophysiology practice*, 2, 161–162. <https://doi.org/10.1016/j.cnp.2017.07.001>
- D'Andrea Meira, I., Romão, T. T., Pires do Prado, H. J., Krüger, L. T., Pires, M. E. P., & da Conceição, P. O. (2019). Ketogenic Diet and Epilepsy: What We Know So Far. *Frontiers in neuroscience*, 13, 5. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00005>
- Dhillon KK, Gupta S. Biochemistry, Ketogenesis. [Updated 2023 Feb 6]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK493179/>

Erickson, N., Boscheri, A., Linke, B., & Huebner, J. (2017). Systematic review: isocaloric ketogenic dietary regimes for cancer patients. *Medical oncology* (Northwood, London, England), 34(5), 72. <https://doi.org/10.1007/s12032-017-0930-5>

Goldberg, E. L., Shchukina, I., Asher, J. L., Sidorov, S., Artyomov, M. N., & Dixit, V. D. (2020). Ketogenesis activates metabolically protective α T cells in visceral adipose tissue. *Nature metabolism*, 2(1), 50–61. <https://doi.org/10.1038/s42255-019-0160-6>

Fink, J., Schoenfeld, B. J., & Nakazato, K. (2018). The role of hormones in muscle hypertrophy. *The Physician and sportsmedicine*, 46(1), 129–134. <https://doi.org/10.1080/00913847.2018.1406778>

Masood W, Annamaraju P, Khan Suheb MZ, et al. Ketogenic Diet. [Updated 2023 Jun 16]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499830/>

Mooli, R. G. R., & Ramakrishnan, S. K. (2022). Emerging Role of Hepatic Ketogenesis in Fatty Liver Disease. *Frontiers in physiology*, 13, 946474. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.946474>

Nakao, R., Abe, T., Yamamoto, S., & Oishi, K. (2019). Ketogenic diet induces skeletal muscle atrophy via reducing muscle protein synthesis and possibly activating proteolysis in mice. *Scientific reports*, 9(1), 19652. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56166-8>

Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2009). *Lehninger. Principios de bioquímica*. <http://repositoriobibliotecas.uv.cl/handle/uvsc1/1513>

Paoli, A., Bianco, A., & Grimaldi, K. A. (2015). The Ketogenic Diet and Sport: A Possible Marriage?. *Exercise and sport sciences reviews*, 43(3), 153–162. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000050>

Paoli, A., Mancin, L., Bianco, A., Thomas, E., Mota, J. F., & Piccini, F. (2019). Ketogenic Diet and Microbiota: Friends or Enemies?. *Genes*, 10(7), 534. <https://doi.org/10.3390/genes10070534>

Paoli, A.; Cenci, L.; Pompei, P.; Sahin, N.; Bianco, A.; Neri, M.; Caprio, M.; Moro, T. Effects of Two Months of Very Low Carbohydrate Ketogenic Diet on Body Composition, Muscle Strength, Muscle Area, and Blood Parameters in Competitive Natural Body Builders. *Nutrients* 2021, 13, 374. <https://doi.org/10.3390/nu13020374>

Paoli, A.; Bianco, A.; Moro, T.; Mota, J.F.; Coelho-Ravagnani, C.F. The Effects of Ketogenic Diet on Insulin Sensitivity and Weight Loss, Which Came First: The Chicken or the Egg? *Nutrients* 2023, 15, 3120. <https://doi.org/10.3390/nu15143120>

- Tabaie, E. A., Reddy, A. J., & Brahmabhatt, H. (2021). A narrative review on the effects of a ketogenic diet on patients with Alzheimer's disease. *AIMS public health*, 9(1), 185–193. <https://doi.org/10.3934/publichealth.2022014>
- Ting, R., Dugré, N., Allan, G. M., & Lindblad, A. J. (2018). Ketogenic diet for weight loss. *Canadian family physician Medecin de famille canadien*, 64(12), 906.
- Vargas, S., Romance, R., Petro, J. L., Bonilla, D. A., Galancho, I., Espinar, S., Kreider, R. B., & Benítez-Porres, J. (2018). Efficacy of ketogenic diet on body composition during resistance training in trained men: a randomized controlled trial. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 15(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s12970-018-0236-9>
- Volek, J. S., Phinney, S. D., Forsythe, C. E., Quann, E. E., Wood, R. J., Puglisi, M. J., Kraemer, W. J., Bibus, D. M., Fernandez, M. L., & Feinman, R. D. (2009). Carbohydrate restriction has a more favorable impact on the metabolic syndrome than a low fat diet. *Lipids*, 44(4), 297–309. <https://doi.org/10.1007/s11745-008-3274-2>
- Williams, T. J., & Cervenka, M. C. (2017). The role for ketogenic diets in epilepsy and status epilepticus in adults. *Clinical neurophysiology practice*, 2, 154-160.
- Yoshida, T., & Delafontaine, P. (2020). Mechanisms of IGF-1-Mediated Regulation of Skeletal Muscle Hypertrophy and Atrophy. *Cells*, 9(9), 1970. <https://doi.org/10.3390/cells9091970>
- Zajac, A., Poprzecki, S., Maszczyk, A., Czuba, M., Michalczyk, M., & Zydek, G. (2014). The effects of a ketogenic diet on exercise metabolism and physical performance in off-road cyclists. *Nutrients*, 6(7), 2493–2508. <https://doi.org/10.3390/nu6072493>
- Zhang, S., Sun, S., Wei, X., Zhang, M., Chen, Y., Mao, X., Chen, G., & Liu, C. (2022). Short-term moderate caloric restriction in a high-fat diet alleviates obesity via AMPK/SIRT1 signaling in white adipocytes and liver. *Food & nutrition research*, 66, 10.29219/fnr.v66.7909. <https://doi.org/10.29219/fnr.v66.7909>

LA PROGRAMACIÓN COMO HERRAMIENTA ESENCIAL PARA EL INGENIERO QUÍMICO DEL SIGLO XXI

PROGRAMMING AS AN ESSENTIAL TOOL FOR THE 21ST-CENTURY CHEMICAL ENGINEER

Jesús Andrés Arzola Flores*, Fernanda Saviñon Flores, Miguel Ángel García Castro, Fausto Díaz Sánchez, Fidel Aaron Maruri Valderrabano

Facultad de Ingeniería Química, BUAP. Av. San Claudio S/N, San Manuel, C.P. 72560. Puebla, México.

jesus.arzolaflares@correo.buap.mx. Tel. (221) 203 8067; maria.savinon@alumno.buap.mx; miguel.garciacastro@correo.buap.mx
fausto.diazs@alumno.buap.mx; mv223470624@alm.buap.mx

<https://orcid.org/0000-0001-9839-982X>
<https://orcid.org/0009-0005-9242-0655>
<https://orcid.org/0000-0003-4459-873X>
<https://orcid.org/0000-0002-0084-0427>
<https://orcid.org/0009-0009-0182-7492>

Año 11 No. 32

Recibido: 1/abril/2025

Aprobado: dd/mmmm/2025

Publicado: 30 de agosto/2025

Resumen

La programación se está volviendo una herramienta clave para los ingenieros de hoy, por lo que para los ingenieros químicos no es la excepción. Frente al boom de tecnologías propias de la industria 4.0 y 5.0, tales como el internet de las cosas, el big data y por supuesto, la inteligencia artificial, saber programar ya no es opcional. En este artículo reflexionamos sobre la necesidad de integrar la programación en la formación de los futuros ingenieros químicos, no solo en asignaturas como métodos numéricos, simulación de procesos o control, sino también a lo largo de todo el programa de estudios de ingeniería química. Además, mostramos algunos paquetes de Python que pueden ser muy útiles en diferentes materias de ingeniería química. Finalmente, proponemos algunas estrategias y consejos para motivar el aprendizaje de la programación tanto para estudiantes como para docentes, con el objetivo de fomentar un cambio en el proceso de enseñanza-aprendizaje de esta disciplina.

Palabras clave: Ingeniería Química, Programación, Python, Simulación de Procesos, Control de Procesos

Abstract

Programming is becoming a key tool for today's engineers, and chemical engineers are no exception. With the rise of Industry 4.0 and 5.0 technologies—such as the Internet of Things, big data, and, of course, artificial intelligence—knowing how to program is no longer optional. In this article, we reflect on the need to integrate programming into the education of future chemical engineers, not only in subjects like numerical methods, process, simulation, or control, but also throughout the entire chemical engineering curriculum. We also highlight several Python packages that can be very useful across different courses. Finally, we propose strategies and tips to encourage programming education among both students and educators, aiming to promote a shift in the teaching and learning approach to this essential discipline.

Keywords: Chemical Engineering, Programming, Python, Process Simulation, Process Control

¿Es importante la programación para los ingenieros químicos?

Hoy en día, dentro del campo de la ingeniería química se ha experimentado un cambio drástico impulsado por las nuevas tecnologías digitales, tales como el internet de las cosas (IoT), el big data y por supuesto, por la inteligencia artificial (Cedeño y col., 2024; Paredes y col., 2025). Lo interesante de esto, es que estas tecnologías tienen como base a la programación, por lo que esta herramienta se ha convertido en una habilidad que los ingenieros químicos del siglo XXI deben conocer y dominar, principalmente porque les permitirá ser competitivos en este nuevo auge de la industria 4.0 y 5.0 (Acosta y col., 2025; Mereles, 2025; Novoa, 2025).

Actualmente, no hay un área donde la inteligencia artificial no haya permeado, por lo que aquí la interrogante principal es ¿qué tan capacitados se encuentran actualmente los ingenieros químicos para enfrentar esta nueva ola de oportunidades?, y a la par, surge otra pregunta ¿qué tanta importancia le están dando las facultades y escuelas de ingeniería química de México al desarrollo de habilidades de programación en los docentes y sobre todo en la comunidad estudiantil?

Como es sabido, la programación no es un tópico fundamental que los estudiantes de ingeniería química desarrollan durante su formación profesional. Aunque existen bastantes herramientas de software dentro de la currícula de ingeniería química, muchas de ellas suelen ser de licencia y, en la mayoría de las veces, poco accesibles para los estudiantes. En raras ocasiones los estudiantes pueden experimentar con ellas para proponer nuevos algoritmos o modificar las metodologías ya existentes dentro de las plataformas. Aunque hoy en día hay muchos lenguajes de programación que son de libre acceso, en la mayoría de las ocasiones no se utilizan en las aulas. Lo anterior, debido a la falta de capacitación o bien

porque existen herramientas que no usan como tal un lenguaje de programación, solo se ocupan para resolver los problemas estándar de los cursos de ingeniería química. En consecuencia, aquí surge la siguiente pregunta ¿Estas herramientas son suficientes para que los estudiantes resuelvan problemas reales?, por ejemplo, aquellos en donde es necesario manipular grandes volúmenes de datos (Rodríguez, 2025).

Actualmente, gracias al auge de herramientas como la inteligencia artificial, en México la implementación de la programación en los planes de estudio de Ingeniería Química ha experimentado un constante crecimiento, debido a que tanto los docentes como los estudiantes están reconociendo su valor como una habilidad fundamental para los ingenieros químicos del siglo XXI. Universidades tanto públicas como privadas han incorporado asignaturas que buscan introducir a los estudiantes en la programación, sin embargo, en muchas ocasiones la falta de capacitación o interés obstaculiza la creación de un ecosistema en donde la programación sea una herramienta utilizada en el día a día.

Algunas de estas asignaturas del currículo de Ingeniería Química que pueden servir como catalizador del uso de la programación por parte de los estudiantes y docentes:

Métodos Numéricos: Esta asignatura es un pilar dentro de la formación de todo ingeniero químico, ya que se centra en el uso de técnicas numéricas para resolver problemas complejos que surgen en todas las áreas de la ingeniería química, tales como la solución de sistemas de ecuaciones algebraicas no lineales, problemas de optimización no lineal, sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales, diferenciación e integración numérica, etc (Beers, 2007). Esta asignatura es fundamental y puede ser un curso en donde se aplique la programación, por ejemplo, los estudiantes podrían recibir un curso previo de fundamentos de programación y posteriormente, aplicar la programación en problemas numéricos. En esta asignatura, los estudiantes pueden emplear lenguajes de programación de alto nivel abiertos tales como Python,

R o Julia para implementar diferentes técnicas numéricas y con ello, mejorar su comprensión sobre el desarrollo de algoritmos computacionales.



Figura 1. Imagen generada con DALL-E. Prompt: Un estudiante universitario mexicano de Ingeniería Química sentado en un escritorio en un laboratorio o sala de estudio, concentrado en la pantalla de su laptop. En la pantalla se ve código en Python relacionado con métodos numéricos (por ejemplo, ecuaciones diferenciales o resolución de matrices). El estudiante viste ropa casual (playera y jeans) y lleva consigo una calculadora científica y un cuaderno con anotaciones de fórmulas químicas y ecuaciones matemáticas. En el fondo, se aprecian detalles relacionados con la ingeniería química, como matraces, tubos de ensayo o esquemas de procesos químicos en una pizarra. La atmósfera transmite estudio y concentración; el estudiante podría estar tecleando activamente o revisando los resultados de la ejecución del código en su computadora. Iluminación clara, mostrando el ambiente académico y el interés del estudiante en la resolución del problema.

Simulación de Procesos: Esta asignatura utiliza gemelos digitales de licencia como Aspen Plus, HYSYS, ChemCAD, así como simuladores de código abierto como COCO Simulator y DWSIM, con el fin de modelar, analizar y optimizar diversos procesos químicos. Aunque muchas de estas herramientas pueden considerarse como “cajas negras”, hoy en día, gracias al auge del modelado híbrido es posible vincular estos simuladores con herramientas como Matlab y Python, para combinar modelos de aprendizaje automático o aprendizaje profundo con modelos mecanísticos para optimizar el

rendimiento de los procesos, validación de modelos, sintonización de parámetros de control, entre otras aplicaciones (Chaves y col., 2016; Sansana y col., 2021; Haydary, 2019).



Figura 2. Imagen generada con DALL-E. Prompt: Un estudiante mexicano universitario de Ingeniería Química, de unos 20 años, sentado frente a una computadora de escritorio en un moderno laboratorio de ingeniería. En la pantalla se aprecia un software de simulación de procesos (similar a Aspen Plus o Aspen HYSYS) mostrando un diagrama de flujo de una planta química. El estudiante viste bata de laboratorio blanca abierta sobre ropa casual, lleva gafas de seguridad sobre la frente y sostiene un cuaderno con apuntes de fórmulas y balances de materia y energía. En el fondo se observan equipos de laboratorio, matraces, columnas de destilación a escala y otros instrumentos de ingeniería química. La atmósfera es luminosa, profesional y muestra la concentración del estudiante mientras analiza los datos y configura el modelo de la planta química.

Control de Procesos: Dentro de la formación de los estudiantes de ingeniería química, también se busca que tengan las herramientas para implementar sistemas de control básicos y avanzados, con el objetivo de que tengan la habilidad de controlar procesos y con esto, asegurar la calidad y seguridad de los mismos (Stephanopoulos, 1984; Smith & Corripio, 2005). En esta asignatura, es de vital importancia que los estudiantes utilicen la programación, ya que al emplear esta herramienta desarrollarán su capacidad de abstracción a la hora de programar, por ejemplo, un controlador PID. Aquí, los

aprendientes no solo pueden emplear la programación para implementar sistemas de control estándar, si no también, combinarlas con herramientas de inteligencia artificial para identificación de sistemas, sintonizar sistemas de control y por supuesto, diagnosticar y predecir fallas.



Figura 3. Imagen generada con DALL-E. Prompt: Un estudiante universitario mexicano de Ingeniería Química trabajando en un laboratorio o sala de control industrial, sentado frente a una computadora. En la pantalla se ven líneas de código y diagramas de control de procesos químicos (pueden incluir bloques de PID, esquemas de lazo de control, etc.). El estudiante viste una bata de laboratorio abierta, con ropa informal debajo, y tiene un cuaderno con anotaciones técnicas al lado del teclado. En el fondo, se observan equipos de proceso a escala de laboratorio o pantallas de simulación industrial (columnas de destilación, reactores, intercambiadores de calor), reflejando un entorno de ingeniería química. El estudiante parece concentrado, ajustando parámetros o analizando gráficas de respuesta de control. La atmósfera general es ordenada, con iluminación blanca de laboratorio, mostrando un ambiente profesional y académico dedicado al desarrollo y validación de un sistema de control para un proceso químico.

Algunas herramientas para aplicar la programación en ingeniería química

Es importante destacar que la programa-

ción no solo debería encontrarse presente en estas asignaturas específicas, sino que también se puede integrar en el plan de estudios de todas las materias formativas de Ingeniería Química. Un ejemplo claro se encuentra en los cursos de fisicoquímica, en donde se pueden utilizar herramientas de Python como el paquete thermo para calcular propiedades de sustancias puras o de mezclas. Similarmente, en cinética química, donde también existen librerías de Python como chemPy para simular diferentes tipos de reacciones. Incluso, para la materia de fenómenos de transporte, con librerías como ht y fluids, que son muy útiles para estudiar el transporte de calor y masa, etc. A continuación, se muestra una tabla donde se exponen las librerías de Python que podrían ser utilizadas en algunas asignaturas del área de formación general en ingeniería del plan de estudios de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (<https://ingenieriaquimica.buap.mx/?q=content/licenciatura-en-ingenier%C3%ADa-qu%C3%ADmica>). En dicha tabla se observan las asignaturas, las librerías de Python que se pueden utilizar, así como algunas aplicaciones.

Tabla 1. Librerías de Python que pueden utilizarse para las materias básicas

Asignatura	Herramientas de Python	Aplicaciones
Álgebra para ingeniería	NumPy https://numpy.org/	- Cálculos de álgebra lineal básica (inversión y operaciones con matrices). - Solución de sistemas de ecuaciones (p. ej., balances de materia).
	SymPy https://www.sympy.org/en/index.htm	- Cálculo simbólico de sistemas de ecuaciones en balances o reacciones químicas. - Generación de soluciones exactas para modelos cinéticos.

Química general y Taller de Introducción a Ingenierías del Área Química	ChemPy https://github.com/bjodah/chempy	- Cálculos de estequiometría y equilibrio químico. - Evaluación de constantes de equilibrio, pH y cinéticas simples. - Simulación de reacciones con parámetros químicos básicos
	Mendeleeev https://pypi.org/project/mendeleeev/	- Acceso rápido a propiedades de los elementos de la tabla periódica (números atómicos, masas, radios, electro-negatividad, etc.). - Consultas de datos químicos fundamentales para problemas de química general.
Química orgánica I y II	RDKit https://www.rdkit.org/	- Representación y edición de estructuras orgánicas (SMILES, Mol, etc.). - Análisis de subestructuras, búsqueda de fragmentos funcionales y generación de descriptores moleculares.
	Open Babel https://openbabel.org/	- Conversión entre distintos formatos de archivo químico (SDF, SMILES, Mol2, etc.). - Limpieza y optimización geométrica inicial de moléculas orgánicas.

Cálculo I, II y III	SymPy https://www.sympy.org/	Cálculo simbólico: derivadas, integrales, límites, series, factorización. Herramientas para simplificar expresiones, matrices simbólicas y cálculo con polinomios.
Fisicoquímica I, II y III	thermo https://thermo.readthedocs.io/	- Propiedades termodinámicas de sustancias puras y mezclas (densidad, Cp, entalpía, etc.). - Ecuaciones de estado (Peng-Robinson, SRK, etc.) y correlaciones para VLE (Equilibrio líquido-vapor). - Estimación de propiedades fisicoquímicas y cálculos de ingeniería de procesos.
	cantera https://cantera.org/	- Simulación de cinética química y termodinámica para mezclas de gases, líquidos y sólidos - Modelado de reacciones en combustión, análisis de llama y equilibrio químico - Útil par procesos donde la velocidad de reacción y equilibrio son relevantes

Física I y II	PyDy https://pydy.readthedocs.io/	-Modelado y simulación de sistemas mecánicos usando la formulación de mecánica analítica(La-grangiana o Newtoniana) -Generación de ecuaciones de movimiento de manera Simbólica y numérica. -Animación y visualización de sistemas multibody (péndulo, engranes, etc)		pingouin https://pingouin-stats.org/	- Biblioteca ligera para estadística: ANOVAs, tests no paramétricos, regresión lineal, correlaciones. - Fácil de usar, con resultados estilo "tabla" listos para reportar. - Ideal para análisis rápidos en diseño de experimentos con técnicas clásicas.
	VPython https://vpython.org/	- Creación de simulaciones 3D interactivas en física (por ejemplo, órbitas planetarias, movimiento de partículas, colisiones). - Visualización fácil de vectores y objetos en un entorno tridimensional. - Muy útil para enseñanza y prácticas de laboratorio virtual.	Ecuaciones diferenciales	SciPy https://scipy.org/	- Funciones de integración numérica para ecuaciones diferenciales ordinarias: <code>scipy.integrate.odeint</code> , <code>solve_ivp</code> . - Métodos de Runge-Kutta, Adams-Bashforth, BDF, etc. - Muy útil para sistemas de EDOs en modelado, simulación y análisis.
Probabilidad y Estadística y Diseño de Experimentos	statsmodels https://www.statsmodels.org/	- Regresiones (lineal, logística, GLM) con análisis detallado (p-valores, intervalos de confianza, diagnósticos). - ANOVA de uno o varios factores, verificación de suposiciones. - Series de tiempo (ARIMA, SARI-MAX) y otras pruebas estadísticas.		FiPy https://www.ctcms.nist.gov/fipy/	- EDPs (ecuaciones diferenciales parciales) con método de volúmenes finitos. - Pensado para problemas de difusión, electroquímica, reacciones químicas, flujos, etc. - Incluye ecuaciones estacionarias y transitorias en mallas regulares.

Análisis numérico y programación	SciPy https://scipy.org/	- Colección principal de métodos numéricos en Python: optimización, integración, interpolación, ecuaciones diferenciales, etc. - Submódulos <code>scipy.optimize</code>, <code>scipy.integrate</code>, <code>scipy.interpolate</code>, <code>scipy.linalg</code>, <code>scipy.fftpack</code>, entre otros.
	SymPy https://www.sympy.org/	- Cálculo simbólico de derivadas, integrales, series, solución exacta de ecuaciones. - Puede combinarse con métodos numéricos para validación o para generar expresiones simplificadas antes de discretizar.

Cada una de las librerías o paquetes de la tabla anterior son de código abierto, es decir, pueden ser consultadas en su página web para saber con precisión cómo se utilizan, cómo se generan los códigos y cómo se realizan los cálculos. Además, es posible adaptar las subrutinas para resolver problemas específicos, lo cual abre un gran abanico de posibilidades para trabajar con la programación en ingeniería química.

Asimismo, existen múltiples librerías de Python que podrían ser utilizadas en cada una de las asignaturas del área de formación básica en ingeniería para sentar las bases y generalizar el uso de la programación. Esto, con el fin de que los estudiantes puedan estar lo suficientemente familiarizados al llegar a los semestres avanzados. Por lo tanto, es crucial que los estudiantes comiencen a tener un acercamiento con los fundamentos de programación desde el primer semestre de su formación superior. En la siguiente tabla, se muestran algunas

librerías de Python que pueden ser utilizadas en las asignaturas formativas del plan de estudios de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Tabla 2. Librerías de Python que pueden utilizarse para las materias formativas.

Asignatura	Herramienta de Python	Aplicaciones
Balances de Materia y Energía	NumPy https://numpy.org/	- Manipulación de arreglos y operaciones matemáticas. - Base para resolver sistemas de ecuaciones lineales en balances (por ejemplo, $A \cdot x = b$). - Soporte para cálculos vectorizados y manejo de grandes volúmenes de datos.
	ChemPy https://github.com/bjodah/chempy	- Cálculos de estequiometría, equilibrio químico y cinética. - Permite plantear y resolver balances de materia con reacciones químicas, buscando conversiones y selectividades. - Simulación de pH, reacciones ácido-base, etc.

Fenómenos de Transporte I y II	FEnICS https://fenicsproject.org/	- Método de Elementos Finitos para ecuaciones diferenciales parciales (PDEs) de flujo, calor y masa. - Resolución de problemas de mecánica de fluidos (Navier-Stokes), difusión, convección-difusión, etc. - Potente y escalable (paralelización en HPC).
	FiPy https://www.ctcms.nist.gov/fipy/	- Método de Volúmenes Finitos: simulación de difusión, convección-difusión, electroquímica, reactivos, etc. - Muy útil para problemas 1D, 2D y 3D en celdas de malla regular. - Facilidad para modelar flujos y transferencia de calor/masa con reacciones químicas.
	PyVista https://docs.pyvista.org/	- Visualización 3D de resultados de simulación (campos de velocidad, temperatura, concentraciones). - Sencilla integración con FEnics, FiPy, etc. para postprocesar mallas y campos en problemas de transporte.

Flujo de fluidos	fluids https://pypi.org/project/fluids/	- Cálculos de mecánica de fluidos en tuberías y equipos: factores de fricción (Darcy-Weisbach, Hazen-Williams), pérdida de carga en accesorios, cálculo de caudal en orificios y válvulas. - Estimaciones de propiedades y correlaciones para flujos.
	OpenPNM https://openpnm.org/	- Estudio de flujo de fluidos en medios porosos a nivel microscópico (redes de poros). - Modelado de permeabilidad, difusión, transporte reactivo (filtración, catálisis, baterías/pilas de combustible).
	SfePy https://sfepy.org/	- Paquete de Elementos Finitos en Python para PDEs (incluyendo ecuaciones de flujo de fluidos). - Permite resolver problemas de mecánica de sólidos, transferencia de calor y acoplarlos con ecuaciones de flujo.

Diseño de Intercambiadores de Calor	ht https://pypi.org/project/ht/	- Cálculo de coeficientes de película (convección forzada, natural, condensación y ebullición). - Factores de ensuciamiento, correcciones para intercambiadores y transferencia por radiación.
	thermo https://thermo.readthedocs.io/	- Propiedades termodinámicas y de transporte. - Modelado de mezclas de fluidos y su comportamiento en intercambiadores de calor. - Compatibilidad con ecuaciones de estado (Peng-Robinson, SRK).
	fluids https://pypi.org/project/fluids/	- Cálculo de coeficientes de transferencia de calor en tuberías y equipos. - Factores de corrección para intercambiadores de calor. - Pérdida de carga y diseño hidráulico complementario.
Cinética y Reactores Homogéneos	ChemPy https://github.com/bjodah/chempy	- Cálculo de equilibrio químico y estequiometría. - Simulación de cinética de reacciones homogéneas. - Resolución de ecuaciones diferenciales en modelos cinéticos simples.

	cantera https://cantera.org/	- Simulación de reactores homogéneos (PFR, CSTR, batch). - Modelado de cinética química compleja (multi-componente, reacciones en cadena). - Cálculo de propiedades termodinámicas y de equilibrio químico.
	SciPy https://scipy.org/	- Resolución de ecuaciones diferenciales en reactores batch, PFR y CSTR (scipy.integrate.solve_ivp). - Optimización de parámetros cinéticos (scipy.optimize).
Procesos de Separación I y II	thermo https://thermo.readthedocs.io/	- Cálculo de propiedades termodinámicas en separación de fases. - Modelado de equilibrios de fases (VLE, LLE, SLE). - Determinación de coeficientes de actividad y ecuaciones de estado
	pyomo http://www.pyomo.org/	- Optimización de procesos de separación (tamaño de columnas, número de etapas). - Modelado algebraico de procesos de adsorción y destilación reactiva.

	Matplotlib https://matplotlib.org/	- Visualización de curvas de equilibrio, perfiles de temperatura y concentración en columnas de separación. - Análisis gráfico de eficiencia y optimización de procesos de separación.
Catálisis y Reactores Heterogeneos	Cantera https://cantera.org/	- Simulación de reacciones heterogéneas en catalizadores sólidos. - Modelado de adsorción, desorción y reacciones superficiales. - Simulación de reactores de lecho fijo y fluidizado.
	ChemPy https://github.com/bjodah/chempy	- Modelado de cinética química en superficies catalíticas. - Simulación de equilibrio químico en reacciones heterogéneas. - Cálculo de parámetros cinéticos a partir de datos experimentales.
	pyomo http://www.pyomo.org/	- Optimización de reactores catalíticos (carga de catalizador, flujo, temperatura). - Modelado algebraico de reactores con múltiples reacciones y etapas.

Investigación de Operaciones	pyomo http://www.pyomo.org/	- Optimización matemática avanzada (lineal, no lineal, entera, estocástica). - Modelado de sistemas complejos en logística, producción y cadenas de suministro.
	PuLP https://coin-or.github.io/pulp/	- Optimización lineal (PL) y entera mixta (MILP). - Modelado de problemas de asignación, transporte, flujo de redes y scheduling. - Compatible con CBC, GLPK, Gurobi, CPLEX.
	CVXPY https://www.cvxpy.org/	- Optimización convexa y cuadrática. - Aplicaciones en portafolios financieros, control de procesos y problemas de diseño óptimo.
Dinámica y Control de Procesos	control https://python-control.readthedocs.io/	- Análisis de sistemas dinámicos (ecuaciones diferenciales, funciones de transferencia, espacio de estados). - Diseño de controladores PID, LQR, MPC.
	gekko https://gekko.readthedocs.io/	- Control predictivo basado en modelos (MPC). - Aplicaciones en optimización de procesos químicos e industriales.

	pyDynamic https://pydynamic.readthedocs.io/	- Identificación de sistemas dinámicos. - Modelado basado en datos y ajuste de parámetros en procesos industriales.
Diseño Procesos y Productos Químicos	BioSTEAM https://biosteam.readthedocs.io/	- Simulación de procesos biotecnológicos. - Modelado de fermentaciones, purificaciones, producción de biocombustibles y biofármacos.
	DW-SIM-Python API https://dw-sim.org/	- Simulación de procesos químicos completos. - Modelado de reactores, intercambiadores de calor, separaciones y reciclajes. - Equilibrio de fases y balances de masa y energía.
	pyomo http://www.pyomo.org/	- Optimización de diseño de procesos químicos. - Modelado de problemas de planificación y síntesis de procesos.
Ingeniería de Servicios Auxiliares	thermo https://thermo.readthedocs.io/	- Simulación de sistemas de generación de vapor y agua de proceso. - Modelado de propiedades termodinámicas en calderas y condensadores.

	pyomo http://www.pyomo.org/	- Optimización del uso de servicios auxiliares. - Diseño de redes de vapor, aire comprimido y sistemas de distribución de energía térmica.
	CoolProp http://www.coolprop.org/	- Cálculo de propiedades de fluidos térmicos (vapor, refrigerantes, aire, agua). - Aplicado en diseño de sistemas de refrigeración y vapor.

Aunque ha existido un gran avance en el desarrollo de lenguajes de programación gratuitos como Python, R o Julia, la mayoría de los docentes y estudiantes de ingeniería química aún no incorporan la programación en su conjunto de habilidades (Sanatinia & Noubir, 2016; Mayer & Bauer, 2015; Bezanson, 2024). Lo anterior se debe en gran manera a que la programación comúnmente se asocia a ingenieros en sistemas o computación. No obstante, en el contexto actual, aprender herramientas de programación, especialmente aquellas gratuitas, abre una gran oportunidad laboral para los futuros ingenieros químicos, ya que les facilitará la comprensión de aquellas tecnologías fundamentadas en la programación, como lo es la inteligencia artificial generativa, la cual ha facilitado el uso de la programación para resolver problemas complejos en ingeniería química.

Es así como se ve reflejada dicha necesidad para realizar correctamente la construcción de "prompts" teniendo conocimientos básicos de programación y, por consiguiente, comprender el código proporcionado por los grandes modelos de lenguaje (LLM, por sus siglas en inglés), (Patil & Gudivada, 2024; Ye, 2023). Hoy en día, existen múltiples lenguajes de programación de acceso libre que pueden ser utilizados dentro de las asignaturas del currículo de Ingeniería Química. En la siguiente tabla se muestra una lista de algunos lenguajes de programación gratuitos, sitios de descarga, tutoriales y posibles aplicaciones en ingeniería

Tabla 3. Algunos lenguajes de programación open source que se pueden utilizar en la enseñanza de la ingeniería química.

Lenguaje de programación	Recursos para aprender	Aplicaciones de Ingeniería Química
Python https://www.python.org/downloads/	- Documentación oficial: https://docs.python.org/3/tutorial/ - El libro de Python https://elliottbrodepython.com/	- Simulación de procesos - Modelado matemático - Análisis de datos - Automatización de tareas
R https://cran.r-project.org/	- Curso gratuito de R en Datacamp: https://www.datacamp.com/courses/free-introduction-to-r - Documentación oficial: https://www.r-project.org/other-docs.html	- Análisis estadístico de procesos - Modelado de datos experimentales - Visualización de datos
Julia https://julialang.org/downloads/	- Curso gratuito de Julia: https://juliaacademy.com/ - Documentación oficial: https://docs.julialang.org/en/v1/	- Cálculo numérico avanzado - Simulación de reactores y procesos - Optimización de procesos químicos
Octave https://www.gnu.org/software/octave/download.html	- Curso de Octave en Coursera: https://www.coursera.org/learn/matlab-octave-basico - Documentación oficial: https://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter/	- Análisis de ecuaciones diferenciales - Simulación de reactores - Modelado de fenómenos de transporte

Scilab https://www.scilab.org/download/latest	- Tutoriales oficiales de Scilab: https://www.scilab.org/tutorials	- Simulación de procesos químicos - Análisis y optimización de sistemas térmicos - Modelado de transferencia de calor y masa
---	---	--



Figura 4. Imagen generada con DALL-E. Prompt: Una estudiante mexicana de ingeniería química con cabello rizado y gafas trabaja en su laptop en un laboratorio moderno. En la pantalla de su computadora, se observan gráficos de datos, modelos de simulación y líneas de código en Python. Alrededor de ella, hay equipos de laboratorio como reactores, espectrómetros y sensores conectados a una interfaz de inteligencia artificial que analiza datos en tiempo real. La estudiante tiene una expresión de concentración mientras revisa los resultados y ajusta parámetros en su modelo. En el fondo, hay una pizarra con ecuaciones matemáticas y diagramas de procesos químicos.

Las herramientas de código abierto, como se muestra en las tablas anteriores, pueden mejorar significativamente la experiencia de aprendizaje y enseñanza en la ingeniería química. Un buen ejemplo es el uso de Python en la simulación de procesos químicos. Tradicionalmente, los simuladores comerciales como ASPEN Plus y ASPEN HYSYS han sido la opción preferida, pero Python ofrece una alternativa flexible y potente al vincularse con estos simuladores a través de una interfaz COM o la API de ASPEN para Python. Además, Python se puede usar con Microsoft Excel y librerías como pandas para analizar datos de simulación. También existen simuladores de código

abierto como DWSIM que se integran directamente con Python, ampliando aún más las posibilidades para la enseñanza y el aprendizaje.

Asimismo, en cuanto al modelado y optimización de reactores, la programación podría ser muy útil, ya que se puede utilizar para resolver sistemas de ecuaciones relacionados con diferentes tipos de reactores. Aquí, los estudiantes pueden explorar cómo pequeños cambios en las condiciones de operación, por ejemplo, cambios de temperatura, presión y concentración, pueden afectar el rendimiento de los reactores. Aparte de eso, los estudiantes de ingeniería química podrían indagar sobre la teoría del caos y su presencia en reactores químicos, el cual es un tópico muy importante y que tampoco se aborda a profundidad dentro de la currícula de ingeniería química.

En general existen muchas áreas de la ingeniería química en donde la programación podría ser muy útil, no obstante, el punto medular es motivar tanto a docentes como a estudiantes en el uso de la programación, mostrando sus ventajas así como la importancia que tendrá en los próximos años.

Algunos consejos

Finalmente, se mencionan algunos consejos tanto para docentes como para estudiantes, con el fin de motivarlos a utilizar la programación en su día a día.

Para los docentes:

1. En la manera de lo posible, trata de enfocarte en casos prácticos, mostrando ejemplos reales o proyectos en donde la programación haya impactado de forma importante a la industria. Hoy en día ya existen muchos casos de éxito, por lo que esto puede servir de motivación para los estudiantes. En la plataforma de Kaggle encontrarás muchos ejemplos (<https://www.kaggle.com/>)

2. Utiliza herramientas 100% accesibles, tales como Python, R o Julia, ya que son muy fáciles de utilizar y gracias a su gran comunidad de desarrolladores, existen muchos paquetes o complementos que puedes utilizar en tus clases, por ejemplo en el

caso de Python, puedes buscar en su repositorio de paquetes (<https://pypi.org/>)

3. Siempre busca fomentar la creatividad de los estudiantes, anímalos a proponer sus propios proyectos, siempre buscando resolver algún problema real. Actualmente, existen plataformas gratuitas en donde puedes obtener datos que te pueden servir durante tus clases, por ejemplo, para realizar análisis de datos. Aquí algunas: Kaggle (<https://www.kaggle.com/>), Google data set research (<https://datasetsearch.research.google.com/>) y UCI Machine Learning (<https://archive.ics.uci.edu/>).

4. Muestra perfiles de profesionales de la ingeniería química que utilicen la programación en su día a día, con el fin de que los estudiantes reconozcan cómo estas habilidades son valoradas en el mercado laboral y cómo puede abrirles puertas a oportunidades. Un buen lugar para comenzar es la plataforma de LinkedIn, muchos profesionales están dispuestos a compartir sus conocimientos gratuitamente y publican constantemente consejos sobre el uso de la programación en ingeniería química. Aquí te dejamos algunos perfiles: Dr. Victor M. Zavala de la Universidad de Wisconsin-Madison (<https://www.linkedin.com/in/vzavala/>) y Dr. Luis Ricardez Sandoval de la Universidad de Waterloo (<https://www.linkedin.com/in/luis-ricardez-sandoval-182b72298/>),

5. Integra la programación en tus clases de manera gradual, comenzando con ejemplos sencillos y busca utilizar plataformas de acceso libre como Google Colab (<https://colab.research.google.com/>) o Kaggle ya que muchas veces no es práctico realizar la instalación de distribuciones como ANACONDA en las computadoras de los estudiantes por los recursos que necesita. No intentes enseñar todo de una vez. Por ejemplo, podrías realizar algunos videos para utilizar la metodología de aula invertida y diseñar ejercicios cortos y prácticos para que los estudiantes los resuelvan en clase. Existen plataformas como Edpuzzle (<https://edpuzzle.com/discover/>) o Nearpod (<https://nearpod.com/>) para trabajar aula invertida.

Lo anterior, promoverá que los estudiantes resuelvan problemas por sí

mismos, por lo que trata de fomentar el aprendizaje activo. No se trata solo de mostrarle código ya hecho, sino de ir elaborando junto a ellos para que adquieran confianza en sí mismos. Puedes realizar un concurso donde los estudiantes resuelvan un problema de ingeniería química utilizando programación, incluso podrías comenzar con un concurso sobre generación de imágenes con inteligencia artificial mencionando a los estudiantes que una de las bases de esta herramienta es la programación. Aquí te dejamos algunas plataformas que te podrían ser de utilidad, Midjourney (<https://www.midjourney.com/home>), Stable Diffusion (<https://stablediffusionweb.com/es>) y Leonardo AI (<https://leonardo.ai/>).

7. Habla sobre las ventajas que tiene usar herramientas como Chat GPT, Gemini, Deep Seek, entre otras para construir código, pero muestra la importancia de que antes de que utilicen estas herramientas de inteligencia artificial, aprendan conceptos básicos de programación.

8. Proporciona recursos y soporte, es decir, trata de ofrecer a los estudiantes materiales para su autoaprendizaje, por ejemplo, puedes crear un canal de youtube, un blog, guías y repositorios para que los estudiantes tengan acceso en todo momento a estos recursos. También podrías crear un repositorio de Github o un libro digital en Gitbook para que los estudiantes lo utilicen como guía en su proceso de aprendizaje. Aquí te dejamos el canal de youtube de nuestro grupo (<https://www.youtube.com/playlist?list=PL6-33Uablg-TUBGYljn.fhxTdbomfGL1cz>). También te dejamos algunos repositorios de Github: Python for Chemical Engineers (<https://github.com/CACHEM/Python-Chemical-Engineers>), CBE2025 Introduction to Chemical Engineering Analysis (<https://github.com/jckantor/CBE2025?tab=readme-ov-file>) y Numerical Methods in Chemical Engineering (<https://github.com/hamidrezanorouzi/numericalMethods>).

9. Algo muy importante, incorpora herramientas visuales e interactivas. Los estudiantes de hoy requieren tecnologías que sean simples de utilizar y fáciles de interpretar. Por ejemplo, podrías utilizar los cuadernos de Google Colab

para agregar apuntes, links de videos de youtube, imágenes de diagramas de flujo de proceso, bloques y de tubería e instrumentación, además de incluir código de Python.

Ahora algunos consejos para que estudiantes de ingeniería química se motiven para aprender a programar:

1. Empieza con un lenguaje de programación amigable y versátil, por ejemplo, podrías comenzar con Python, ya que es muy fácil de aprender, además tiene una sintaxis muy clara y fácil de entender. Este lenguaje de programación es bastante utilizado en muchas áreas para análisis de datos, automatización e incluso creación de videojuegos. Puedes comenzar con Google Colab (<https://colab.research.google.com/>), para usarlo solo necesitas tener una cuenta de correo de gmail.

2. Realiza proyectos prácticos y no te limites a la teoría. Toma el libro que más te guste de ingeniería química e intenta resolver los problemas con el uso de algún lenguaje de programación, no te frustres, el aprendizaje lleva su tiempo. Por ejemplo, podrías proponer un pequeño proyecto sobre un balance de materia de un reactor, resolverlo e incluso si te es posible, comparar la solución con datos experimentales. Si estás iniciando en la programación, los siguientes sitios pueden ser de tu interés: PyClubs (<https://docs.pyclubs.org/python-across-all-disciplines/disciplines/chemical-engineering>) y el Libro de Python (<https://ellibrodepython.com/>).

3. Emplea librerías de Python que puedes utilizar en tus materias durante tus estudios de ingeniería química. En la Tabla 1 y 2 de este documento podrás encontrar algunas librerías o paquetes que te pueden ser de utilidad. Trata de leer su documentación oficial y busca problemas de ingeniería química en donde podrías utilizarlas.

4. Algo muy importante, colabora y aprende con otros estudiantes. Únete a comunidades o clubes de programación, por ejemplo, la Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla cuenta con su Club de Inteligencia Artificial y Programación.

5. Lo más importante, no tengas miedo a cometer errores, recuerda que la programación implica prueba y error. Aprende poco a poco y con el tiempo identificarás fácilmente los errores en tu código, sin embargo, es de vital importancia que la pongas en práctica, no se trata solo de tomar cursos, sino de aplicar todo el conocimiento adquirido.

Para ambos grupos:

1. Siempre mantén la curiosidad por la programación, recuerda que es un campo en constante evolución, por lo que debes mantenerte actualizado. Por ejemplo, explora cada mes las nuevas herramientas, lenguajes y aplicaciones que puedan facilitar tu trabajo o proceso de enseñanza-aprendizaje. Recomendamos visitar constantemente el sitio del índice TIOBE (<https://www.tiobe.com/tiobe-index/>) para conocer las tendencias en cuanto a lenguajes de programación.

2. Es muy importante lo siguiente, siempre celebra los pequeños logros, recuerda que lo que se celebra siempre se fortalece. Es claro que aprender a programar puede ser desafiante, pero cada pequeño avance es un gran paso hacia el dominio de una habilidad muy solicitada en la actualidad.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses

Agradecimientos

Los autores agradecen a la SECIHTI por el financiamiento para los estudios de posgrado de los estudiantes María Fernanda Saviñon Flores (2023-000002-01NACF-00835), Fausto Díaz Sánchez (300349) y Fidel Aaron Maruri Valderrabano (1140530).

Referencias

- Acosta, K. R., Nasimba, E. D. L. Á. M., & Díaz, A. C. (2025). Importancia de las habilidades digitales para la enseñanza universitaria: Revisión de literatura desde el año 2020. *Conectividad*, 6(1), 240–248.
- Beers, K. J. (2007). *Numerical methods for chemical engineering: Applications in MATLAB*. Cambridge University Press.
- Bezanson, J., Edelman, A., Karpinski, S., & Shah, V. B. (2024). The Julia programming language. <https://julialang.org>
- Cedeño, E. I. B., Quintero, A. R. T., Quiñónez, O. G. A., Zamora, M. E. P., & Prado, N. G. V. (2024). Análisis de tendencias y futuro de la inteligencia artificial en la educación superior: Perspectivas y desafíos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(1), 3061–3076.
- Chaves, I. D. G., López, J. R. G., Zapata, J. L. G., Robayo, A. L., & Niño, G. R. (2016). *Process analysis and simulation in chemical engineering*. Springer.
- Haydary, J. (2019). *Chemical process design and simulation: Aspen Plus and Aspen HYSYS applications*. John Wiley & Sons.
- Mayer, P., & Bauer, A. (2015, Abril). An empirical analysis of the utilization of multiple programming languages in open source projects. In *Proceedings of the 19th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering* (pp. 1–10).
- Mereles, J. I. (2025). Transformación digital en educación: Competencias, innovación pedagógica y desafíos sistémicos. *Revista Paraguaya de Educación a Distancia (REPED)*, 6(1), 1–2.
- Novoa, M. G. G., Alcalá, M. D. S. P., & Gamboa, R. M. (2025).

Habilidades identificadas de pensamiento computacional, programación y motivación académica en estudiantes de pregrado. *Transregiones*, (9), 13–40.

Paredes, D. A. V., Arias, O. O. F., & Martínez, L. C. C. (2025). Impacto de la inteligencia artificial en el aprendizaje de la programación informática en los estudiantes universitarios. *Ciencia y Educación*, 6(3), 33–50.

Patil, R., & Gudivada, V. (2024). A review of current trends, techniques, and challenges in large language models (LLMs). *Applied Sciences*, 14(5), 2074.

Python Software Foundation. (n.d.). PyPI – the Python Package Index. <https://pypi.org>

Rodríguez, L. V. P. (2025). Integración de proyectos STEAM en el aula potenciando el aprendizaje interdisciplinario y las habilidades en los estudiantes de educación. *Conocimiento Global*, 10(1), 34–45.

Sanatinia, A., & Noubir, G. (2016). On GitHub's programming languages (arXiv preprint arXiv:1603.00431). arXiv. <https://arxiv.org/abs/1603.00431>

Sansana, J., Joswiak, M. N., Castillo, I., Wang, Z., Rendall, R., Chiang, L. H., & Reis, M. S. (2021). Recent trends on hybrid modeling for Industry 4.0. *Computers & Chemical Engineering*, 151, 107365.

Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2005). Principles and practices of automatic process control. John Wiley & Sons.

Stephanopoulos, G. (1984). Chemical process control (Vol. 2). Prentice Hall.

Ye, Q., Axmed, M., Pryzant, R., & Khani, F. (2023). Prompt engineering a prompt engineer (arXiv preprint arXiv:2311.05661). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2311.05661>

REPERCUSIONES DE LA DIETA SOBRE LA MICROBIOTA INTESTINAL Y SU RELACIÓN CON EFECTOS EN LA SALUD. MICROBIOTA Y SISTEMA INMUNE EN RATAS WISTAR (PRIMERA PARTE)

REPERCUSSIONS OF THE DIET ON THE INTESTINAL MICROBIOTA AND ITS RELATIONSHIP WITH EFFECTS ON HEALTH. MICROBIOTA AND IMMUNE SYSTEM IN WISTAR RATS (FIRST PART)

Ivador Negrete-Lira*
Rolando Salvador García-Gómez
María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química,
Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302 y 303
de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Edificio
E-3 Alimentos y Química Ambiental, Conjunto E, Circuito de la
Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de
México, México

Correos-e: salvador.nl538@gmail.com*
rolandogarciagomez@quimica.unam.mx
mcduran@quimica.unam.mx

<https://orcid.org/0009-0008-8074-8225>
<https://orcid.org/0000-0002-4135-9605>

<https://orcid.org/0000-0001-9509-908X>
Recibido: 4. Noviembre.2024
Revisado: 30. Junio.2024
Publicado: 30. Agosto.2025
A11N93.25/1011

Resumen (3 partes)

La salud es un tema importante para la vida de los seres humanos y hasta relativamente pocos años se ha encontrado que la microbiota intestinal o flora microbiana que simbióticamente coexiste con ellos tiene una estrecha relación con la dieta y la salud holística del Homo sapiens. Por cuestiones éticas, las ratas de la estirpe Wistar ha sido desde hace más de un siglo el objeto de estudio y en esta breve revisión bibliográfica dividida en tres partes, el objetivo global fue buscar las posibles relaciones de la dieta desde el nacimiento hasta la senectud sobre la microbiota intestinal. En la primera parte se abordaron sus efectos en el sistema inmunológico y digestivo y se buscaron estudios sobre organismos carentes de microbiota u "organismos libres de gérmenes" ("germ free" en inglés) desde el punto de vista de la salud. En la segunda parte se dio particular importancia a los estudios sobre los efectos sobre la microbiota intestinal de los aditivos alimentarios por sus amplias aplicaciones en la industria alimentaria y bebidas no alcohólicas, así como sobre cambios fisiológicos, metabólicos o nutrimentales provocados por diversas enfermedades que afectan la salud del hospedero o anfitrión. En la tercera parte se buscaron también estudios sobre probióticos y prebióticos específicos que mejoren o mantengan la eubiosis (equilibrio en la microbiota) y se dan pautas para mejorarla a través de la medicina preventiva. Pudo constatarse en estos tres enfoques que, para la primera parte, la dieta repercute en el desarrollo completo del tracto gastrointestinal desde el momento de nacer, así como en el funcionamiento del sistema inmunológico. Los organismos carentes de microbiota u "organismos libres de gérmenes" ("germ free" en inglés) tienen problemas de salud a lo largo de su vida. En la segunda parte, los aditivos alimentarios como los edulcorantes y los conservadores demostraron tener efectos negativos sobre la microbiota intestinal. La disbiosis intestinal puede promover desregulaciones en el organismo provocando inflamaciones sistémicas, así como enfermedades autoinmunes o mal funcionamiento inmunitario. Finalmente, en la tercera parte, se encontró que la inmunoregulación es de suma importancia para un sano funcionamiento del sistema inmune aún en individuos sanos mediante probióticos, prebióticos y alimentos especializados. Algunos estudios recomiendan que la medicina preventiva considere las relaciones entre la microbiota intestinal y el resto de los sistemas del hospedero (anfitrión).

Palabras clave: Microbiota intestinal; ratas de la estirpe Wistar; eubiosis; disbiosis; aditivos alimentarios; sistema inmunológico; desarrollo y funcionamiento del sistema inmune.

Nota: Estas tres contribuciones están basadas en la tesis profesional del primer autor. Algunas partes están transcritas de ese libro. De acuerdo con los tiempos actuales en que se están usando paqueterías que detectan similitudes, obviamente, estas transcripciones aparecerían en un análisis empleando estas paqueterías. Los dos coautores, que fueron sus asesores, consideran que esto es aceptable. Los tres autores invitan a las y los lectores(as) a leer la tesis en TESIUNAM si desean ampliar lo presentado en estas tres contribuciones

Abstract (Three parts)

Health is an important issue for the life of human beings. Until relatively few years, it has been found that the intestinal microbiota or microbial flora that symbiotically coexists with them has a close relationship with the diet and holistic health of *Homo sapiens*. For ethical reasons, rats of the Wistar strain have been the object of study for more than a century. In this brief bibliographic review divided into three parts, the overall objective was to search for the possible relationships of the diet from birth to senescence on the intestinal microbiota. In the first part, its effects on the immune and digestive systems were addressed. In the second part, particular importance was given to studies on the effects of food additives on the intestinal microbiota due to their wide applications in the food and non-alcoholic beverage industry. Also, on physiological, metabolic or nutritional changes caused by various diseases that affect the health of the host. In the third part, studies were also sought on specific probiotics and prebiotics that improve or maintain eubiosis (balance in the microbiota) and guidelines are given to improve it through preventive medicine. It could be seen in these three approaches that, for the first part, diet has an impact on the complete development of the gastrointestinal tract from the moment of birth, as well as on the functioning of the immune system. Organisms lacking microbiota or "germ-free organisms" have health problems throughout their lives. In the second part, food additives such as sweeteners and preservatives were shown to have negative effects on the intestinal microbiota. Intestinal dysbiosis can promote deregulation in the body, causing systemic inflammation, as well as autoimmune diseases or immune malfunction. Finally, in the third part, it was found that immunoregulation is of utmost importance for a healthy functioning of the immune system even in healthy individuals through probiotics, prebiotics and specialized foods. Some studies recommend that preventive medicine consider the relationships between the intestinal microbiota and the rest of the host systems.

Keywords: Intestinal microbiota, Wistar rats, food additives, immune system, development and functioning of the immune system

Note: These three contributions are based on the professional thesis of the first author. Some parts are transcribed from that book. In accordance with the current times in which packages that detect similarities are being used, obviously, these transcripts would appear in an analysis using these packages. The two co-authors, who were his advisors, consider

Introducción

Los seres humanos cuentan con alrededor de 20,000 genes, según el Proyecto del Genoma Humano (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK132204/>) que codifican productos funcionales como son las proteínas y, entre ellos, están los genes necesarios para realizar la digestión. En contraste, el genoma de los consorcios bacterianos posee una cantidad mucho mayor (más de 300 veces) y, por ende, es posible esperar que dicho genoma aporte una mayor cantidad de proteínas digestivas necesarias para el ser humano. Un ejemplo concreto son las enzimas que ayudan a metabolizar a los carbohidratos. El ser humano únicamente produce 17 de (https://fmvz.unam.mx/fmvz/p_estudios/apuntes_bioquimica/Unidad_8.pdf) estas enzimas con su genoma, mientras que los microorganismos presentes en el tracto digestivo producen cerca de 200 enzimas activas para metabolizarlos (Merino-Rivera et al., 2021). El avance de las ciencias 'ómicas' (en particular las tecnologías de secuenciación), permiten tener una visión más amplia, así como una descripción detallada de los diferentes miembros que forman la comunidad bacteriana y de su abundancia relativa. Esto no sucedía con anterioridad debido a las limitaciones de las técnicas tradicionales, las cuales han ido evolucionando a lo largo del tiempo (Korpela, 2018; Robles-Alonso y Guarner, 2013).

La microbiota intestinal se define como el conjunto de microorganismos tales como bacterias, levaduras, virus y algunas arqueas que viven en el intestino. La mayor parte de ella reside en el intestino grueso, en donde se ubica principalmente la biodegradación bacteriana (Korpela, 2018). Los microorganismos juegan un papel muy importante, especialmente en la síntesis de vitaminas, la protección contra microorganismos patógenos y la mejora sobre el funcionamiento del sistema inmune (Gual-Grau, 2019).

Antes se le denominaba flora bacteriana o flora intestinal y tiene una relación de simbiosis tanto de tipo comensal como de mutualismo. Este último es lo mejor ya que el mutualismo es una interacción biológica entre individuos de diferentes especies, en donde ambos se benefician y mejoran su

aptitud biológica o eubiosis (Figuras 1a,b). La de tipo comensal no es deseable, puesto



Figura 1a. Caricatura de la simbiosis del aparato digestivo humano y su microbiota (Wikipedia, 2024)

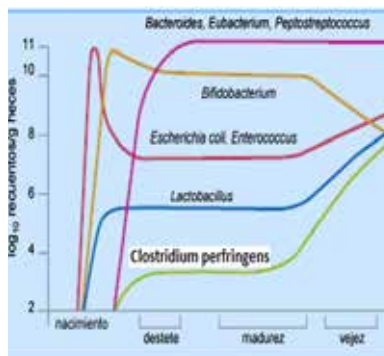


Figura 1b. Evolución de la microbiota a lo largo de la vida humana (Delgado-Palacio, 2005, de Mitsuka, 1992)

Del mismo modo, la falta de la microbiota intestinal o de su correcta colonización en el intestino, produce diversas afectaciones, no solamente de salud, sino también del desarrollo integral de cada individuo (Cár-

denas-Guzmán, 2024). Esto se menciona en la teoría de la higiene la cual supone que el exceso de limpieza y la disminución en la exposición a las bacterias a temprana edad, impide el correcto desarrollo de los mecanismos inmunorreguladores, promoviendo respuestas proinflamatorias y efectos adversos de manera permanente (Strachan, 2000). Los mamíferos que se desarrollan en condiciones libres de gérmenes ("germ free" en inglés) poseen un desarrollo corporal deficiente presentando una pared intestinal atrófica, un corazón, pulmones e hígado de baja masa, así como un sistema inmune inmaduro con niveles de inmunoglobulinas notablemente bajos. A su vez, los individuos libres de gérmenes se utilizan para diversos estudios por su fuerte respuesta ante algunas enfermedades como, por ejemplo, el cáncer. Esto ocurre debido a que su sistema inmune, el cual no ha sido entrenado, combate en ocasiones de manera más efectiva y eficiente este tipo de enfermedades llegando incluso a ser eximidos de presentar algunas enfermedades comunes que presentan algunos individuos convencionales (Icaza-Chávez, 2013; King y Rusell, 2006; Li, 2014; Vanucci et al., 2007). También se da el caso contrario, de que los organismos libres de gérmenes son más débiles ante algunos tipos de cáncer y especialmente cuando presentan disbiosis a edades avanzadas (Biragyn y Ferrucci, 2018; Faustino-Rocha et al., 2023; Guo et al., 2022; Kustrimovic et al., 2023; Oseni et al., 2023).

El sistema inmune es el encargado de combatir enfermedades e infecciones, mostrando una relación estrecha con la microbiota intestinal y la dieta durante su etapa de maduración y desarrollo (Hansen et al., 2012; Hooper y Macpherson, 2010). El sistema inmune de la región intestinal es posiblemente la parte más compleja de todo el sistema, por lo que su estudio es importante, ya que es fundamental para el correcto desarrollo de todo el sistema inmune y de la salud en general. Por ello, la relación simbiótica inadecuada entre el hospedero y su microbiota pueden definir problemas para la salud, provocando diversas afectaciones, las cuales repercuten en la presencia de varias enfermedades (Hansen et al., 2012).

La microbiota tiene una cercana dependencia con los patrones dietéticos presentados

a corto y largo plazo en la vida del individuo, ya que se ha demostrado en varias especies de mamíferos, que los cambios en la dieta influyen considerablemente en la composición y funcionamiento de la microbiota (Gual-Grau, 2019). Debido a esta dependencia resulta de gran importancia el estudio de los aditivos alimentarios. Estas sustancias se encuentran presentes en prácticamente todos los productos elaborados por la industria alimentaria. Se emplean porque, supuestamente, generan ciertos beneficios en los productos, siendo uno de los principales el aumento de su vida de anaquel. Sin embargo, muchos de los aditivos alimentarios y sus combinaciones, aún requieren de pruebas que avalen su inocuidad y que no alteren el metabolismo, ya que estos aditivos pueden o no tener influencia en la microbiota intestinal (Cao et al., 2020).

Dada la naturaleza química de los aditivos, repercutirán en mayor o menor medida sobre la salud del individuo que los consume. De la misma manera, las repercusiones sobre la microbiota intestinal de los aditivos alimentarios tienen muchas variables, como son las dosis, los tiempos de consumo, las formas de consumo, la matriz alimentaria donde se consumen, la edad del consumidor, así como posibles efectos sinérgicos entre varios de ellos. Algunos aditivos tienen consecuencias, no solamente sobre la microbiota intestinal, sino también sobre los órganos o células que producen cambios nutricionales y fisiológicos de interés. Debido a lo expuesto anteriormente, los estudios sobre los aditivos alimentarios son de suma importancia, aun cuando haya sido aprobado su uso y comercialización (Cao et al., 2020).

En el mismo contexto de investigación, se han encontrado fundamentos para afirmar la participación de la microbiota intestinal en diversas enfermedades, tales como la obesidad, la diabetes mellitus, el cáncer colorrectal o de próstata, la inflamación intestinal, descalcificaciones, enfermedades cardiovasculares e incluso repercusiones directas sobre enfermedades neurológicas, presentando nuevamente el énfasis en la salud humana (Cao et al., 2020).

Existen diversas enfermedades que se producen únicamente por deficiencias en la microbiota intestinal. Estas poseen un especial interés por las posibles aplicaciones en tratamientos médicos que puedan corregirlas. En este sentido, los investigadores recientemente han relacionado a las enfermedades autoinmunes con la microbiota intestinal. Las estimulaciones provenientes de este conjunto microbiota-intestino junto con la permeabilidad intestinal y la llamada disbiosis podrían terminar en una sobreestimulación del sistema inmune y, por lo tanto, provocar que la inflamación sistémica termine dañando órganos o tejidos sanos (Opazo et al., 2018; Xu et al., 2019). Tanto la inmunidad sobreexpresada como la baja inmunidad pueden ser controladas o estimuladas con probióticos y prebióticos específicos. Lo anterior lo han señalado investigadores denominando este efecto como inmunomodulación. Este efecto funciona mediante la supresión o estimulación con fines benéficos al sistema inmune. Todo esto sucede a través del control relativo de la microbiota intestinal, ya sea con el uso de probióticos, prebióticos o incluso con alimentos que actúen de maneras similares, ya sea para un acompañamiento de un tratamiento médico o como un tratamiento preventivo natural (Borrue, 2007; Shanahan, 2001).

Es por ello que el futuro de la medicina preventiva se basará quizás en estos parámetros biológicos de un individuo: La microbiota intestinal, la colonización del epitelio intestinal, la dieta y el correcto desarrollo del sistema inmune. Todos estos factores se vuelven el objeto de estudio de esta revisión bibliográfica, que se ha dividido en tres partes, siendo esta la primera, con sus distintas relaciones, características y consecuencias (Nagpal et al., 2014).

Con la finalidad de entender mejor los factores anteriormente propuestos, la comunidad científica ha optado por su estudio empleando animales modelo de laboratorio para comprender la influencia que tiene cada uno de los factores mencionados. Entre ellos, se encuentran las ratas de la estirpe Wistar debido a que estos animales modelo poseen una similitud en cuanto a la fisiología y bioquímica humana,

así como en el desarrollo de órganos clave para el funcionamiento de sus sistemas. Los efectos de los aditivos alimentarios podrían determinarse con la ayuda de algunas observaciones histológicas, inmunohistoquímicas entre otras técnicas. Particularmente, las similitudes de mayor interés en la comunidad científica han sido las provenientes de la fisiología de su sistema digestivo, de su sistema inmune (en relación con sus tejidos, células e incluso su diversidad de proteínas) y de ciertas proporciones de Phyla bacterianas. Con lo anterior es posible asociar los efectos de diversas enfermedades presentes en ellas. De igual modo que como sucede en los humanos, es así una manera sencilla de emular las condiciones que generan, curan o influyen sobre diversas enfermedades de interés en la investigación médica (Hernández-Hernández, 2018).

Consecuentemente, el objetivo de este artículo fue el de estudiar en un modelo animal las repercusiones sobre la microbiota intestinal y la maduración del sistema inmunológico. Dependiendo del tipo de dieta suministrada considerando si en la dieta se consumían diversos aditivos alimentarios y sus cambios en situaciones de eubiosis y disbiosis y abordando el desarrollo de exceso de masa corporal y obesidad, así como algunas enfermedades, la diabetes mellitus, el cáncer, la inflamación intestinal y la descalcificación. Esta primera parte abordó sus efectos en el sistema inmunológico y digestivo, dando una breve introducción sobre los animales modelo estudiados y se buscaron estudios sobre organismos carentes de microbiota u "organismos libres de gérmenes" ("germ free" en inglés) desde el punto de vista de la salud.



ProQuest, SciFinder), en libros digitales consultados en la misma biblioteca y en bases de datos abiertas independientes de la UNAM. Debido a las características de

confinamiento ocasionadas por el COVID-19, no se planteó la obtención de datos experimentales de ningún tipo; por lo que el trabajo realizado fue de tipo documental. El procedimiento de ejecución fue el siguiente: Una vez que fueron encontrados los artículos de interés, se realizó su lectura, interpretación, análisis, abstracción y discernimiento de cada uno. Con ello, el enfoque que se buscó en esta primera parte de los tres artículos se encontró relacionado con los siguientes incisos:

a) La relación de la microbiota intestinal



c) Búsqueda de estudios sobre organismos carentes de microbiota, los "organismos libres de gérmenes" (siguiendo en inglés) desde el punto de vista de la salud

6. Colon (cortesía de Hernández-Hernández, 2018)

Animal modelo (ratas de la estirpe Wistar)

Las ratas de la estirpe Wistar (Imagen 1) son ratas albinas que fueron desarrolladas en el Instituto Wistar de Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos, en 1906 (Hernández-Hernández, 2018).

científica para estudiar la fisiología de la digestión. Poseen un sistema que se encuentra formado por órganos capacitados en la recepción, reducción mecánica, digestión química, absorción del alimento y de la bebida, así como de la eliminación de residuos no absorbidos. En orden, las partes de este sistema son: Cavidad oral, esófago, duodeno, yeyuno, íleon, ciego, colon, recto y ano (Imagen 2).

En la rata, el estómago tiene dos porciones, glandular y no glandular. También se encuentran como parte del sistema las glándulas salivales, el hígado y el páncreas, que vierten sus secreciones dentro del tubo digestivo (Hernández-Hernández, 2018). El sistema digestivo controla 5 funciones que son: Motilidad, secreción, digestión, absorción y almacenamiento. Estas son orquestadas por medio de un sistema intrínseco y extrínseco. Este está formado a su vez por dos componentes, nervios y secreciones endócrinas (Señales químicas secretadas en el torrente sanguíneo). Los elementos del sistema nervioso intrínseco se encuentran entre las distintas capas del tubo digestivo, mientras que las de control extrínseco, se encuentran fuera de las paredes del tracto digestivo. El sistema nervioso intrínseco presenta dos componentes: El sistema nervioso enteral y las hormonas digestivas (gastrina, péptido inhibidor gástrico, colecistocinina, secretina y motilina) (Hernández-Hernández, 2018).

Sistema digestivo de ratas de la estirpe Wistar

El sistema digestivo de las ratas Wistar es de los preferidos por la comunidad

Sistema inmune de las ratas Wistar

El sistema inmune de las ratas Wistar es análogo al del ser humano: Una red de células, tejidos y órganos especializados en reconocer sustancias extrañas y microorganismos patógenos, así como de defender al cuerpo de ellos. Dichos órganos y tejidos incluyen a la médula ósea, el bazo, el timo, las amígdalas, las membranas mucosas, los ganglios linfáticos, el tejido linfoide y los vasos del sistema linfático. Existen referencias aproximadas de la composición de la subpoblación de los linfocitos presentes en sangre realizados mediante estudios citométricos en donde se aprecian diferencias que son únicamente dependientes del sexo de esta estirpe de ratas. Se ha observado que en las ratas macho existe un menor conteo de linfocitos de ayuda o "T-helpers" en inglés, y una mayor proporción de linfocitos reguladores "T". A su vez, existen recuentos más altos de células CD4+ (tipo específico de linfocitos que encabezan la lucha del organismo del individuo contra infecciones) en hembras y de células CD8+ (Tipo específico de linfocitos que pueden destruir células cancerosas y otros agentes patógenos invasores) en machos. Una de las partes de mayor importancia en esta investigación

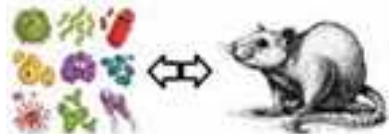
es el sistema inmunológico de la mucosa intestinal. Este sistema es el componente inmune más grande del cuerpo. Se encuentra formado por la mucosa asociada con el tejido linfoide o MALT (Mucosa-associated lymphoid tissue, por sus siglas en inglés) donde se encuentra aproximadamente la mitad de toda la población de linfocitos. Las células de este tejido linfoide se encuentran dispersas a lo largo de los tejidos de la mucosa y están dentro de una estructura especial en donde se desarrollan las respuestas inmunitarias. Estas células generan un efecto de inmunidad en todos los demás folículos linfáticos debido a sus efectos de circulación. El tejido MALT del sistema digestivo, se conforma principalmente por el tejido linfoide asociado con el conducto salival (DAIT) (Duct-associated lymphoid tissue, por sus siglas en inglés) y el tejido linfoide asociado con el intestino (GALT) (Gut-associated lymphoid tissue, por sus siglas en inglés). Este último defiende a toda la región del

intestino de infecciones o patologías. Una de las funciones principales de este tejido es producir y secretar inmunoglobulina A (IgA) a través de reacciones específicas de antígeno de superficies mucosas dependientes de linfocitos Th2 [aunque también pueden ocurrir reacciones mediadas por células citotóxicas (Tipo de linfocitos específicos que pueden destruir ciertas células, como células extrañas, cancerosas o células infectadas por algún virus. Estas también suelen ser llamadas células T citolíticas) y linfocitos Th1]] (Elinav et al., 2013; Haley, 2003; Márquez et al., 2000; Ramiro-Puig et al., 2007; Ruiz-Iglesias et al., 2020). El tejido MALT se puede dividir por su funcionalidad en sitios efectores y sitios inductivos. Los sitios inductivos contienen tejidos linfoides secundarios, en los cuales ocurre el cambio de clase de inmunoglobulinas IgA y la expansión clonal (aumento del número de células por mitosis) de células B en respuesta a la activación de las células T específicas de antígenos (sustancias provenientes del ambiente, como virus, bacterias, sustancias químicas, provocando que el sistema inmune produzca anticuerpos en su intento de combatirla al reconocerla como sustancia extraña). Cuando cambian las células T y B estas pueden migrar a los sitios efectores, en los cuales, la IgA secretora o S-IgA es secretada a través del epitelio de la mucosa. En las ratas Wistar la S-IgA también puede ingresar al intestino mediante el conducto biliar extrahepático debido a que sus hepatocitos también producen componentes secretores.

Los tipos de inmunoglobulinas presentes en diversas especies pueden ser comparados con fines prácticos, como se muestra en la Tabla 1, observando la similitud entre ratas y humanos (Elinav et al., 2013; Haley, 2003; Márquez et al., 2000; Ramiro-Puig et al., 2007; Ruiz-Iglesias et al., 2020).



El sistema inmune en la región intestinal es posiblemente la parte más compleja de todo el sistema, por lo que la relación simbiótica adecuada entre el hospedero y su microbiota pueden definir problemas para la salud, provocando diversas afecciones que pueden repercutir en la presencia de



los efectos de la dieta sobre la microbiota intestinal y las repercusiones de la nutrición sobre el desarrollo del sistema inmunológico. Relacionando la nutrición, la microbiota intestinal y el desarrollo, el funcionamiento del sistema inmunológico y la microbiota intestinal influye directamente sobre la homeostasis energética de los individuos, afectando directamente sobre el desarrollo de obesidad y algunos trastornos metabólicos. De igual manera, la microbiota puede regular genes del hospedero que controlan algunos procesos metabólicos y alterar el fenotipo (Álvarez et al., 2021).

Muchos microorganismos de la microbiota intestinal están relacionados con el metabolismo de carbohidratos, como una fuente adicional de energía proveniente



virus y hongos, cooperando en procesos de nutrición y brindando asistencia en el desarrollo del sistema inmune, así como en diversas funciones metabólicas. Las actuales tecnologías de secuenciación del gen 16S permiten obtener datos más cercanos a la realidad, consiguiendo expresar las poblaciones bacterianas del tracto digestivo con mayor facilidad (Hansen et al., 2012; Icaza-Chávez, 2013).

Lactancia materna

La lactancia materna durante los primeros meses de vida humana se realiza con la finalidad de obtener nutrimentos y componentes bioactivos. Estos factores bioactivos transferidos por la madre son los necesarios para generar el correcto desarrollo de la mucosa intestinal, la microbiota y el sistema inmune del lactante (García-López, 2011; Torres-Castro et al., 2020).

Los factores de crecimiento transformante TGF- β 2 y EGF (Torres-Castro et al., 2018) son suplementados en la dieta y, junto con la leche materna, solucionan desequilibrios de los linfocitos Th1 y Th2, evitando también la permeabilidad intestinal y previniendo la enterocolitis necrotizante (Mihatsch et al., 2011). La Figura 3 muestra a ratas lactantes (Espinosa, 2009).

Importancia de la microbiota intestinal en el desarrollo fisiológico de los individuos

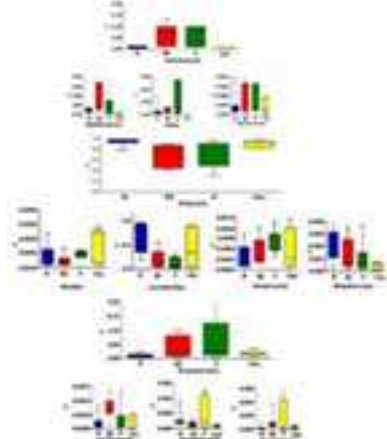
Organismos libres de gérmenes

Un organismo libre de gérmenes es aquel que nació por cesárea bajo condiciones estériles (aprovechando la aparente esterilidad del útero) y que, posterior a su nacimiento, fue mantenido en un área estéril y nutrido mediante alimentos esterilizados. En otras palabras, es un organismo que carece de microorganismos, virus, parásitos y cualquier otra forma de vida que no sea la del propio individuo (King y Russell, 2006). Cuando los roedores libres de gérmenes son alimentados con dietas con un alto contenido de grasas y carbohidratos, ganan un menor porcentaje de masa corporal. Además, en comparación con roedores convencionales se encuentran libres de la resistencia a la insulina. La microbiota intestinal de los roedores convencionales promueven el almacenamiento de triglicéridos circulantes en los adipocitos, mientras que los ratones libres de gérmenes tienen un aumento en la tasa de oxidación de ácidos grasos de hígado y de músculo (Li, 2014).

La microbiota intestinal, como ya se mencionó, es una pieza clave en el correcto desarrollo del tracto gastrointestinal, así como en la inmunomodulación de su mucosa junto con todos los beneficios previamente mencionados. Algunos estudios intentan encontrar la relación entre los organismos libres de gérmenes y la actividad del sistema inmune. Lo anterior sigue siendo aún un tema abierto a debate. No se sabe si es que repercute en todo el sistema inmune o solamente en la región asociada con el intestino (Vannucci et al., 2007). Se sospecha que las ratas libres de gérmenes pueden tener algunas diferencias fisiológicas con los individuos normales. Por ejemplo, hay descripciones de ratas libres de gérmenes con resistencia a la degeneración del miocardio (Tejido muscular del corazón que se encarga de bombear sangre por todo el sistema circulatorio mediante su contracción y relajación) que sí presentan sus análogas con presencia de gérmenes. En específico, las ratas Wistar libres de gérmenes son resistentes a la poliarteritis nodosa (vasculitis necrosante de arterias de bajo y mediano calibre, las cuales producen eventualmente fallas multiorgánicas). No obstante, existen más problemas que ventajas en este tipo de organismos; un ejemplo de ello son las hemorragias espontáneas ocurridas por la hipovitaminosis de vitamina K. Estas hemorragias ocurren por

la deficiencia en la producción de vitamina K y su baja asimilación debido a la ausencia de microbiota intestinal (King y Russell, 2006). En ratas libres de gérmenes, el ciego (parte del sistema digestivo) puede tener un tamaño 5 veces mayor al que se considera normal; debido a que la presión osmótica es mucho mayor al no contar con microorganismos y a que tiene una baja cantidad de iones en el agua contenida en el intestino. Asimismo, la pared intestinal es mucho más delgada que la común, lo cual provoca comúnmente que las ratas adultas tengan una rotación en el intestino, generando una torsión en los vasos sanguíneos y en el mesenterio, provocando una obstrucción intestinal (King y Russell, 2006). En ratas macho libres de gérmenes se ha reportado una alta prevalencia de cálculos renales (50% en hembras libres de gérmenes contra solamente 2%), atribuidos al aumento de calcio, citratos y pH en la orina. Sin embargo, estudios realizados con estas ratas demostraron que al dejar de ser libres de gérmenes y adquirir artificialmente una microbiota intestinal, se eliminaba el aumento de incidencia de formación de cálculos renales (King y Russell, 2006). Adicionalmente, las ratas libres de gérmenes presentan un corazón más pequeño, un bajo rendimiento cardíaco y un bajo consumo de oxígeno. En cuanto al desarrollo del sistema inmunológico, las ratas y los ratones libres de gérmenes presentan un tamaño reducido de las placas de Peyer y de ganglios linfáticos mesentéricos, así como también de cantidades muy reducidas de inmunoglobulinas IgA e IgM. Esto puede ser ocasionado debido a que la microbiota intestinal funciona como una fuente de señales reguladoras del sistema inmunológico y al no existir dichas señales, el sistema no se desarrolla de modo normal, manteniéndose justamente subdesarrollado. Existen poliglúcidos (los glúcidos son compuestos orgánicos cuyo monómero es la glucosa; hasta hace pocos años se usaba la palabra "sacáridos" pero la sacarosa es un glúcido formado por una glucosa y una fructosa por lo que estaba siendo usado impropriamente) bacterianos como los de *Bacteroides fragilis*, que dirigen la maduración celular y física del sistema inmunológico, como la corrección de deficiencias entre Th1 y Th2 e incluso la formación de tejido linfoide. Los microorganismos intestinales también afectan el desarrollo de células T de la mucosa

intestinal; así como de células mieloides y su activación en mamíferos recién nacidos, por lo que todos estos beneficios se traducen como defectos en las ratas libres de gérmenes (Li, 2014). Las ratas Wistar libres de gérmenes se han convertido en un modelo animal muy utilizado para el estudio de distintos tipos de cáncer como el de próstata y colorrectal. Esto es debido, en parte, a que su sistema inmune tiene una respuesta más activa que las ratas Wistar que poseen una microbiota intestinal, con hechos bastante particulares. Por ejemplo, las ratas libres de gérmenes no pueden desarrollar cáncer de ciego al ser inducida



prebióticos y probióticos específicos para regular la inmunomodulación ante enfermedades de manera específica, volviendo más eficientes el funcionamiento del sistema inmune. Existen estudios como el de Gineva et al (2011), quienes buscaban asociar la microbiota intestinal con enfermedades relacionadas con el consumo de alimentos. Estos autores observaron cambios producidos en el tejido intestinal debido a la enfermedad celiaca. Estos cambios se apreciaron en mayor grado en ratas Wistar libres de gérmenes. Además, se potenció el efecto adverso en ratas que tenía microorganismos patógenos colonizando su tracto gastrointestinal.

Desarrollo y funcionamiento del sistema inmune en conjunto con la microbiota intestinal

El sistema inmune de las ratas no se encuentre completamente desarrollado al nacer y las células del sistema inmune, las inmunoglobulinas, tienen una actividad disminuida (Martin et al., 2010). Hay evidencias de la maduración y desarrollo del sistema inmune provocados por la exposición a agentes microbianos, dando la hipótesis de la higiene y los problemas de poblaciones con exceso de higiene (Devalapalli et al., 2006). Por ello, es importante la homeostasis inmunológica y el desarrollo gastrointestinal durante el primer año de vida (Martin et al., 2010). Hay cooperación y funcionamiento de la microbiota intestinal y el sistema inmune posterior a la maduración. Massot-Cladera et al. (2014) mencionan que alimentos, como el chocolate, al estar presente en la dieta regular de muchas personas, debería tener algún impacto en el sistema inmune. En su estudio de 2014 se presentan las repercusiones del consumo de polifenoles de cacao (en concentraciones de 0, 0.2, 0.4, 0.8%) en ratas hembra de la estirpe Wistar, demostrando que su consumo repercutió benéficamente en su sistema inmune gracias a los polifenoles contenidos en el alimento.

Wang et al. (2017) estudiaron los efectos sobre el sistema inmune y la microbiota intestinal al consumir el extracto de Echinacea purpúrea (Figura 4). Esta planta ha sido utilizada como medicina natural por nativos americanos y europeos por múltiples generaciones por sus distintas actividades biológicas. Actúa como antiinflamatorio, antioxidante y posee propiedades antibacterianas y de inmunomodulación. Wang et al., (2017) mencionan que Echinacea purpúrea se utiliza como un complemento alimenticio en enferme-

de Echinacea purpúrea con respecto de un fármaco llamado "Pidotimod®", el cual, está indicado para problemas de inmunodeficiencia, alteraciones en madurez de linfocitos T, así como en necesidades de inmunoregulación. Las pruebas con Pidotimod® en ratas Wistar fueron con un grupo control joven y uno de edad más avanzada (14 semanas) durante 6 semanas con una dieta normal, comparando los efectos debidos al uso del fármaco versus los efectos del uso de la planta medicinal en ambos grupos. Echinacea purpurea y el fármaco Pidotimod® tuvieron una gran similitud en efectos inmunoreguladores sugiriendo que la hierba tuvo un efecto positivo sobre el sistema inmune. Además, Echinacea purpurea promueve la inmunidad y la reducción de la inflamación celular (Wang et al., 2017). Los cambios que provoca el consumo de E. purpurea en la microbiota intestinal de las ratas no fueron del todo favorables, ya que disminuyeron proporciones de géneros considerados como benéfico, por ejemplo el género *Lactobacillus*. Se observaron efectos similares entre E. purpurea y el fármaco Pidotimod®.



son el ácido cítrico, ácido cafeico, diversos polifenoles, glicoproteínas y algunos poliglúcidos obtenidos a partir de sus raíces. Wang et al. (2017) compararon el consumo

La dosis empleada de extracto de Echinacea purpurea fue de 600 mg/kg contra 150 mg/kg del fármaco Pidotimod®. Por otro lado, también se observaron semejanzas en la madurez inmune con el control de 14 semanas. Por tanto, estos autores sugieren que Echinacea purpurea podría conducir del estado juvenil al estado maduro del sistema inmune. En un futuro, los perfiles metabólicos, así como un estudio más detallado de la microbiota intestinal, podrían conducir al descubrimiento del consumo de complementos alimenticios con el fin de producir la correcta maduración de este sistema (Wang et al., 2017).

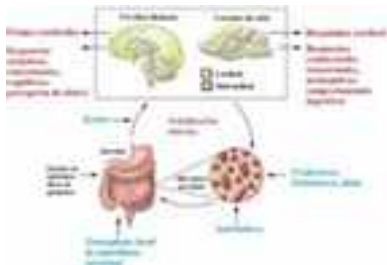
Interacciones entre la microbiota intestinal y las regiones inmunes de órganos externos al intestino

La piel es un sistema dinámico que forma un equilibrio entre células T dependientes y *Staphylococcus epidermidis*, moduladas por el complejo mayor de histocompatibilidad (Zheng et al., 2020). El eje intestino-pulmón, donde metabolitos de señalización derivados del intestino promueven la hematopoyesis (producción de células sanguíneas, de hema, “sangre” y poiesis, “formación”; en el ser humano se lleva a cabo en la médula ósea durante toda la vida; siendo de los mecanismos más activos en cuanto a proliferación, puesto que diariamente se producen alrededor de 2.3×10^{11} eritrocitos, 2.3×10^{11} plaquetas y 7.3×10^{10} granulocitos, indispensables para mantener los valores normales de las células circulando en la sangre; no solamente la médula ósea es un órgano hematopoyético, pues durante la vida embrionaria y fetal otros órganos tienen esta función, la hematopoyesis inicia en el saco vitelino, alrededor de la segunda semana de gestación -fase mesoblástica-; continúa alrededor de la quinta semana en el hígado y posteriormente en el bazo, siendo estos dos los que toman esta función y son los responsables de la hematopoyesis en el segundo trimestre del embarazo -fases hepática y esplénica-;

la médula ósea inicia la producción sanguínea a partir del cuarto mes y continúa con esta función durante toda la vida de la persona -fase mieloide-; en condiciones patológicas el hígado y el bazo pueden recuperar su función hematopoyética después del nacimiento [https://accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1995§ionid=150301032]) y producto de ella las células mieloides migran al pulmón confiriendo protección sobre inflamaciones de las vías respiratorias (Zheng et al., 2020) y el eje intestino-hígado, con patrones moleculares asociados con bacterias intestinales que influyen en el desarrollo de células hepáticas (Zheng et al., 2020) (Figura 5a).

Eje microbiota-intestino-cerebro

El sistema gastrointestinal es el principal contacto con el ambiente circundante y el interior de un individuo, presentando una serie de estímulos sobre el sistema nervioso central, el cerebro e incluso sobre el comportamiento general del individuo. Todo ello está influenciado por el metabolismo y por la actividad bacteriana de la microbiota intestinal. El eje intestino-cerebro, recientemente denominado como “eje-microbiota-intestino-cerebro” integra muchas de las rutas de comunicación, con señalizaciones endocrinas del sistema inmune y las que dependen del nervio vago. Existen también señalizaciones de metabolitos microbianos intestinales funcionando como moléculas de señalización para el cerebro (Stillings et al., 2016). El desarrollo del cerebro en gestación no solamente se ve afectado de manera directa por el entorno, también teorías recientes intentan relacionar la influencia de la microbiota intestinal materna con el desarrollo fetal cerebral. El estudio con ratones de Degroote et al. (2016) mostró que la exposición durante el embarazo



La situación anterior se torna interesante al ser estudiada en seres humanos, ya que a menudo muchas mujeres embarazadas reciben antibióticos durante el proceso de gestación para combatir infecciones comunes en el tracto urinario o bien por profilaxis, debido a la ruptura temprana de algunas membranas en los cambios fisiológicos naturales del embarazo. La constante exposición a antibióticos se ha relacionado con un mayor riesgo de parálisis cerebral en bebés prematuros e incluso se han señalado causantes de defectos congénitos y malformaciones en el tubo neural (estructura embrionaria precursora del sistema nervioso central, el cual se terminará desarrollando en el cerebro y médula espinal del individuo) (Degroote et al., 2016). Para ratas de la estirpe Wistar, Degroote et al., (2016) estudiaron el comportamiento en ratas cuya madre tuvo una microbiota intestinal alterada previa a la concepción con antibióticos no absorbibles. Se obtuvo como resultado que la exposición de la madre a sulfonamida (succinilsulfatiazol) alteró el comportamiento de su descendencia, ya que las crías, tuvieron un aumento de comportamientos similares a la ansiedad. Asimismo, presentaron interacciones sociales reducidas en el periodo correspondiente al prepuberal y cuando alcanzaron la edad adulta tuvieron una capacidad reducida de filtrar información. Adicionalmente, presentaron una disminución de la actividad sensorial y motora. En la microbiota intestinal, el succinilsulfatiazol redujo la cantidad de coliformes intestinales y de bacterias ácido-lácticas como los *Lactobacillus*. Estas últimas fueron las mayormente afectadas, ya que se disminuyó su proporción hasta en 100 veces, produciéndose un aumento en enterococos y en levaduras (Degroote et al., 2016; Tochitani et al., 2016).

La microbiota intestinal continúa regulando diversos aspectos cerebrales a lo largo de la vida. Hay evidencias de la regulación del

eje microbiota-intestino-cerebro: En primer lugar, organismos libres de gérmenes (en muchas especies) mostraron cambios considerables en su cerebro, comparados con organismos homólogos que sí poseían una microbiota intestinal completa. Las deficiencias que se evidenciaron fueron las siguientes: Disrupciones en la ruta del axón (camino mediante el cual se transmite una señal electroquímica entre neuronas). Comportamientos similares a la ansiedad, baja actividad motora, cambios específicos en el desarrollo de la microglía (tipo específico de célula de soporte neuronal presente en el sistema nervioso central cuya función principal es actuar como célula inmune), respuestas inusuales a estímulos como el miedo, deterioro de la neuroplasticidad (capacidad del sistema nervioso para modificarse y formas conexiones nerviosas en respuesta a información nueva, el desarrollo, la disfunción o el daño), disrupciones en la producción de los péptidos de señalización que regulan la obesidad en el hipotálamo, cambios en sus interacciones sociales, altas señalizaciones de GABA (ácido gamma-aminobutírico, por sus siglas en inglés, que presenta una señalización de neurotransmisor inhibitorio) en el hipocampo, problemas de memoria e, incluso, diferencias entre la longitud de las dendritas neuronales o deficiencias de crecimiento en la espina interneuronal, acompañadas de diferencias de crecimiento en el cerebro (Chunhai et al., 2018; Cryan et al., 2019; Mayer et al., 2015). También en ratas Wistar hay evidencias que han demostrado problemas de captación cerebral de triptófano, trastornos de ansiedad y comportamientos sociales distintos entre su misma estirpe. Se han observado problemas en los recubrimientos de mielina en los axones, cuya principal función es aumentar la eficiencia y rapidez de señalización eléctrica en las neuronas (Mayer et al., 2015). La colonización de individuos con cepas bacterianas específicas provocó cambios de comportamiento. Estos estudios se han mostrado como hallazgos con potencial de investigación en la salud humana (Bercik et al., 2011; Bravo et al., 2011). En tercer lugar, poblaciones completas de niños que padecieron una infección, presentaron alteraciones en el eje intestino-cerebro. Al ser replicado en un modelo animal se demostró que incluso las infecciones de bajo nivel repercuten, presentando inhibición en la actividad del

sistema inmune (Thabane et al., 2010). En cuarto lugar, la utilización de antibióticos, tanto a temprana edad como en edad adulta, presentan efectos de largo plazo en el cerebro, la médula espinal, y el sistema nervioso entérico (Cryan et al., 2019; O'Mahony et al., 2014; Verdu et al., 2008). Algunos autores como Arseneault-Bréard et al. (2012), Chunchai et al. (2018), Cru-meyrolle-Arias et al. (2014) y Davari et al. (2013) utilizaron ratas como modelos de estudio del eje microbiota-intestino-cerebro debido a las similitudes con el eje humano. Las ratas libres de gérmenes con comportamientos similares a la ansiedad, estrés, depresión, respuestas extrañas a estímulos sensoriales, mala capacidad de memorización y consecuencias metabólicas generales, al ser colonizadas con microbiotas sanas (mediante trasplantes de materia fecal) presentan cambios benéficos y mejoras con el uso de probióticos.

Existen grandes diferencias en la estructura cerebral de las ratas y de los humanos. Las ratas tienen una proporción menor de la región cortical y, por el contrario, presentan una proporción mayoritaria en la región subcortical. En contraste, en el ser humano es de manera inversa, tal como se muestra en la Figura 5b (Mayer et al., 2015). El cerebro de las ratas normalmente es utilizado para estudios de bioquímica cerebral o bien de respuestas conductuales, ya que no es posible estudiarlo con la misma profundidad que el cerebro humano. Para el caso concreto de las ratas libres de gérmenes existen aún más limitaciones, ya que existe una amplia variedad de diferencias bioquímicas cerebrales (hipotalámicos, pituitarios, etc.) e intestinales, así como de comportamiento. Recientemente se ha sugerido que el ambiente intrauterino no es estéril, existiendo también la posible participación de microorganismos intrauterinos en el desarrollo del cerebro fetal (Mayer et al., 2015).

Puede terminarse esta primera parte diciendo que la composición de la microbiota repercute en el completo desarrollo del tracto gastrointestinal desde el momento de nacer, así como en el funcionamiento del sistema inmunológico.

Los organismos carentes de microbiota u "organismos libres de gérmenes" ("germ free" en inglés) tienen problemas de salud a lo largo de su vida.

Conclusiones

De acuerdo con el objetivo general y los específicos de esta investigación bibliográfica, a continuación se presentan las conclusiones alcanzadas en esta primera parte. La estrecha relación entre la microbiota intestinal y el sistema inmunológico es uno de los caminos de investigación más importantes en la actualidad debido a sus repercusiones médicas en apoyo al tratamiento de diversas enfermedades.

- El correcto desarrollo del sistema inmunológico incluye los estímulos externos adecuados al medio sobre el tracto gastrointestinal, una correcta colonización del epitelio gastrointestinal y una adecuada alimentación, la eubiosis intestinal.

- Por otra parte, la disbiosis intestinal puede promover desregulaciones en el sistema inmune, inflamaciones sistémicas, enfermedades autoinmunes e, incluso, diversas enfermedades de las cuales se conocen este tipo de relaciones cada vez con mayor certeza.

Reconocimiento / Acknowledgments

Los autores y la autora agradecen al personal del sistema de bibliotecas de la institución a la que pertenecen por su valiosa asesoría a pesar de la pandemia. También agradecen la cuidadosa revisión y sus significativas aportaciones que mejoraron notablemente este manuscrito por parte del Dr. Samuel Mendoza-Pérez. Este documento está basado de manera íntegra en la tesis profesional del primer autor (Negrete-Lira, 2022). Las personas interesadas pueden complementar la lectura de esta contribución en esa tesis / The authors thank the staff of the library system of the institution to which they belong for their valuable advice despite the pandemic. They also appreciate the careful review and valuable contributions that significantly improved this manuscript by Dr. Samuel Mendoza-Pérez. This document is based entirely on the professional thesis of the first author (Negrete-Lira, 2022). Interested people can complement the reading of this contribution in that thesis

Contribución de autoría / Authors' contributions:

S.N.-L. realizó la búsqueda de literatura, hizo los análisis de cada contribución y escribió el primer borrador con la ayuda de R.S.G.-G. y M.d.C.D.-d.-B. Los dos autores y la autora revisaron críticamente esta y las versiones anteriores del documento / *S.N.-L. conducted the literature search, performed the analyzes, and wrote the first draft with the help of R.S.G.-G. and M.d.C.D.-d.-B. All authors critically reviewed this and previous versions of the document*

Financiación / Funding:

Los autores expresan que no hubo financiamiento para realizar este manuscrito. Esta investigación bibliográfica utilizó los recursos digitales proporcionados por la Universidad Nacional Autónoma de México a su Dirección General de Bibliotecas (Biblioteca Digital, BiDiUNAM), especialmente la consulta de revistas internacionales indexadas, bancos de tesis de la UNAM y otras instituciones nacionales y extranjeras así como otros materiales disponibles en redes internacionales. Debido a la contingencia por Covid-19, la UNAM financió el aumento de la velocidad de internet para búsquedas bibliográficas / *The authors express that there has been no funding to carry out this systematic review. This bibliographic research used the digital resources provided by the National Autonomous University of Mexico to its General Directorate of Libraries (Digital Library, BiDiUNAM), especially the consultation of international indexed journals, thesis banks of the UNAM, and other national and foreign institutions as well as other materials available in international networks. Due to the Covid-19 contingency, UNAM financed the increase in internet speed for bibliographic searches.*

Conflicto de interés

Los autores y la autora expresan que no existen conflictos de interés en la redacción del manuscrito / *The authors express that there are no conflicts of*

Referencias

Álvarez, J., Fernández-Real, J.M., Guarner, F., Gueimonde, M., Rodríguez, J.M. Saenz-de-Pipaon, M., Sanz, Y. 2021. Microbiota intestinal y salud / Gut microbes and health. *Gastroenterología y Hepatología*. 44(7): 519-535. DOI: 10.1016/j.gastrohep.2021.01.009

Anónimo. Sin fecha. https://fmvz.unam.mx/fmvz/p_estudios/apuntes_bioquimica/Unidad.8.pdf

Arseneault-Bréard, J., Rondeau, I., Gilbert, K., Girard, S.A., Tompkins, T.A., Godbout, R., Rousseau, G. 2012. Combination of *Lactobacillus helveticus* R0052 and *Bifidobacterium longum* R0175 reduces post-myocardial infarction depression symptoms and restores intestinal permeability in a rat model. *British Journal of Nutrition*. 107(12): 1793-1799. <https://doi.org/10.1017/S0007114511005137>

Bercik, P., Denou, E., Collins, J., Jackson, W., Lu, J., Jury, J., Deng, Y., Blennerhassett, P., Macri, J., McCoy, K.D., Verdu, E.F., Collins, S.M. 2011. The intestinal microbiota affect central levels of brain-derived neurotrophic factor and behavior in mice. *Gastroenterology*. 141: 599-609. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2011.04.052>

Biragyn, A., Ferrucci, L. 2018. Gut dysbiosis: A potential link between increased cancer risk in ageing and inflammaging. *Series. Geriatric Oncology*. 19(6): E295-E304. [https://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045\(18\)30095-0/abstract](https://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045(18)30095-0/abstract)

Borrueal, N. 2007. Probióticos y prebióticos en la enfermedad inflamatoria intestinal. *Gastroenterología y Hepatología*. 30(7): 419-425. <https://doi.org/10.1157/13108812>

Bravo, J.A., Forsythe, P., Chew, M.V., Escaravage, E., Savignac, H.M., Dinan, T.G., Bienenstock, J., Cryan, J.F. 2011. Ingestion of *Lactobacillus* strain regulates emotional behavior and central GABA receptor expression in a mouse via the vagus nerve. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108(38): 16050-16055. <https://doi.org/10.1073/pnas.1102999108>

Cao, Y., Liu, H., Qin, N., Ren, X., Zhu, B., Xia X. 2020. Impact of food additives on the composition and function of gut microbiota: A review. *Trends in Food & Science Technology*. 99: 295-310. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.006>

Cárdenas-Guzmán, G. 2024. El microbioma humano. *Revista Cómo ves*. Pub. UNAM. México. <https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/167/el-microbioma-humano#:~:text=Es%20m%C3%A1s%3A%20estos%20microbios%20benignos,es%20decir%2C%20360%20veces%20m%C3%A1s>

Carter, P., Foster, H. 2006. Gnobiotic . En *The Laboratory Rat*, Suckow, M., Weisbroth, S., Franklin, C., eds. Academic Press, 2a ed., pp. 693-710. Nueva York, EE. UU.

Chunchai, T., Thunapong, W., Yasom, S., Wanchai, S., Eaimworawuthikul, S., Metzler, S., Lungkaphin, A., Pongchaidecha, A., Sirilun, S., Chaivasut, C., Pratchayasakul, W., Thiennimitr, P., Chattipakorn, N., Chattipakorn, S.C. 2018. Decreased microglial activation through gut-brain axis by prebiotics, probiotics, or synbiotics effectively restored cognitive function in obese-insulin resistant rats. *Journal of Neuroinflammation*. 15(1): 1-15. <https://doi.org/10.1186/s12974-018-1055-2>

Cinova, J., De Palma, G., Stepankova, R., Kofronova, O., Kverka, M., Sanz, Y., Tuckova, L. 2011. Role of intestinal bacteria in gliadin-induced changes in intestinal mucosa: Study in germ-free rats. *PLOS ONE*. 6(1): e16169. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016169>

Crumeyrolle-Arias, M, Jaglin, M., Bruneau, A., Vancassel, S., Cardona, A., Daugé, V., Naudon, L., Rabot, S. 2014. Absence of the gut microbiota enhances anxiety-like behavior and neuroendocrine response to acute stress in rats. *Psychoneuroendocrinology*. 42: 207-217. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2014.01.014>

Cryan, J.F., O'Riordan, K.J., Cowan, C.S., M., Sandhu, K.V., Bastiaanssen, T.F.S., Boehme, M., Codagnone, G.M., Cusotto, S., Fulling, C., Golubeva, A.V., Guzzetta, K.E., Jaggar, M. Long-Smith, C.M., Lyte, J.M., Martin, J.A., Molinero-Perez, A., Moloney, G., Morelli, E., Morillas, E., O'Connor, R., Cruz-Pereira J.R., Peterson,

¹Viene del griego gnotos, conocido y biota consorcio microbiano. Por lo tanto, cuando se habla de gnotobios (GN), se hace referencia a un animal con microbiota conocida y también se aplica cuando esta no existe o no se detecta. "La primera descripción de una investigación con animales gnotobioticos o libres de gérmenes (LG), *Thierisches Leben ohne Bakterien im Verdauungskanal* (Vida animal sin bacterias en el tracto digestivo), realizada por George Nuttal y H. Thierfelder, que trabajaban en Berlín, se remonta a finales del siglo XIX" (traducido de Carter y Foster, 2006)

V.R., Rea, K., Ritz, N.L., Sherwin, E., Spichak, S., Teichman, E.M., Van de Wouw, M., Ventura-Silva, A.P., Wallace-Fitzsimons, S.E., Hyland, N., Clarke, G., Dinan, T.G. 2019. The microbiota-gut-brain axis. *Physiological Reviews*. 99(4): 1877-2013. <https://doi.org/10.1152/physrev.00018.2018>

Davari, S., Alaei, S.A., Salami, M. 2013. Probiotics treatment improves diabetes-induced impairment of synaptic activity and cognitive function: Behavioral and electrophysiological proofs for microbiome-gut-brain axis. *Neuroscience*. 240: 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2013.02.055>

Degroote, S., Hunting, D.J., Baccarelli, A.A., Takser, L. 2016. Maternal gut and fetal brain connexion: Increased anxiety and reduced social interactions in Wistar rat offspring following peri-conceptual antibiotic exposure. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*. 71(1): 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2016.06.010>

Delgado-Palacio, S. 2005. Microbiota intestinal humana: Análisis y evolución de poblaciones representativas e identificación de bacterias probióticas. Tesis de Doctorado. Universidad de Oviedo. Departamento de Biología Funcional. Área de Microbiología. Oviedo, España. Tomada de Mitsuoka, T. 1992. Intestinal flora and aging. *Nutrition Reviews*. 50(12): 438-446. <file:///C:/Users/Dra%20Duran/Downloads/TESIS20Susana20Delgado.pdf>

Devalapalli, A.P., Leshner, A., Shieh, K., Solow, J.S., Everett, M.L., Edala, A.S., Whitt, P., Long, R.R., Newton, N., Parker, W. 2006. Increased levels of IgE and autoreactive, polyreactive IgG in wild rodents: Implications for the hygiene hypothesis. *Scandinavian Journal of Immunology*. 64(2): 125-136. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3083.2006.01785.x>

Elinav, E., Henao-Mejia, J., Flavell, R. 2013. Integrative inflammasome activity in the regulation of intestinal mucosal immune responses. *Mucosal Immunology*. 6: 4-13. <https://doi.org/10.1038/mi.2012.115>

Espinoza, J. 2009. Desnutrición temprana en ratas, impacto comparado con el hombre. <https://>

www.revistaserendipia.com/ciencia/periodismo-cient%C3%ADfico/desnutrici%C3%B3n-temprana-en-ratas-impacto-comparado-con-el-hombre

García-López, R. 2011. Composición e inmunología de la leche humana. *Acta Pediátrica Mexicana*. 32(4): 223-230. <http://dx.doi.org/10.18233/APM32No4pp223-230>

Faustino-Rocha, A.I., Jota-Baptista, C., Nascimento-Gonçalves, E., Oliveira, P.A. 2023. Evolution of models of prostate cancer: their contribution to current therapies. *Anticancer Research*. 43(1): 323-333. DOI: <https://doi.org/10.21873/anticancer.16167>

García-López, R. 2011. Composición e inmunología de la leche humana. *Acta Pediátrica Mexicana*. 32(4): 223-230. <http://dx.doi.org/10.18233/APM32No4pp223-230>

Gual-Grau, A. 2019. Gut microbiota dysbiosis in diet-induced obesity. A focus on the influence of genetics, circadian rhythms, and potential prebiotics. Tesis Doctoral. Universitat Rovira i Virgili, Facultat de Química. Tarragona, España.

Guo, J., Huang, X., Dou, L., Yan, M., Shen, T., Tang, W., Li, J. 2022. Aging and aging-related diseases: From molecular mechanisms to interventions and treatments. *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 7, 391. <https://doi.org/10.1038/s41392-022-01251-0>

Haley, P. 2003. Species differences in the structure and function of the immune. *Toxicology*. 188(1): 49-71. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(03\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(03)00043-X)

Hansen, C.H.F., Nielsen, D.S., Kverka, M., Zakostelska, Z., Klimesova, K., Hudcovic, T., Tlaskalová-Hogenová, H., Hansen, A.K. 2012. Patterns of early gut colonization shape future immune responses of the host. *PLoS ONE*. 7(3): e34043. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034043>

Hernández-Hernández, J.C. 2018. Atlas de anatomía de los aparatos respiratorio,

digestivo y urogenital de la rata Wistar. Tesis de Licenciatura. UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Cuautitlán Izcalli, México.

Hooper, L., Macpherson, A. 2010. Immune adaptations that maintain homeostasis with the intestinal microbiota. *Nature Reviews Immunology*. 10: 159-169. <https://doi.org/10.1038/nri2710>

Icaza-Chávez, M.E. 2013. Microbiota intestinal en la salud y la enfermedad. *Revista de Gastroenterología de México*. 78: 240-248. <https://doi.org/10.1016/j.rgm.2013.04.004>

Jašarević, E., Howerton, C.L., Howard, C.D., Bale, T.L. 2015. Alterations in the vaginal microbiome by maternal stress are associated with metabolic reprogramming of the offspring gut and brain. *Endocrinology*. 156: 3265-3276. <https://doi.org/10.1210/en.2015-1177>

King, W., Russell, S. 2006. Metabolic, traumatic, and miscellaneous diseases. En *The Laboratory Rat*. Suckow, M., Weisbroth, S., Franklin, C., eds. Academic Press, 2a ed., pp. 513-549. Nueva York, EE. UU.

Korpela, K. 2018. Diet, microbiota, and metabolic health: Trade-Off between saccharolytic and proteolytic 'fermentation'. *Annual Review of Food Science and Technology*. 9: 65-84. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012830>

Kustrimovic, N., Bombelli, R., Baci, D., Mortara, L. 2023. Microbiome and prostate cancer: A novel target for prevention and treatment. *International Journal of Molecular Sciences*. 24(2): 1511. doi: 10.3390/ijms24021511

Li, R. 2014. Microbiome. En *Encyclopedia of Food Microbiology*. Batt, A., Tortorello, M., eds. Academic Press, 2ª ed., pp. 788-792. Nueva York, EE. UU.

Márquez, M.G., Galeano, A., Olmos, S., Roux, M.E. 2000. Flow cytometric analysis of intestinal intraepithelial lymphocytes in a model of immunodeficiency in Wistar rats. *Cytometry*. 41(2): 115-122. <https://doi.org/10.1002/1097->

²Fermentation en inglés es fermentación. Este nombre fue dado por Louis Pasteur a la reacción de la glucosa catalizada por la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en ambiente anaerobio para obtener alcohol etílico y bióxido de carbono en forma estequiométrica. En los años 70 del siglo veinte en un congreso internacional de expertos en lo que ahora se conoce como biotecnología (biochemical engineering entonces) se decidió que la palabra fermentación sería solamente para este caso y que las demás se denominarían biorreacciones (bioreactions) y los equipos donde se realizaran sería biorreactores (bioreactors) y no fermentadores (nota de la última autora)

- Martin, R., Nauta, A., Ben-Amor, K., Knippels, L., Knol, J., Garssen, J. 2010. Early life: Gut microbiota and immune development in infancy. *Beneficial Microbes*. 1(4): 367-382. <https://doi.org/10.3920/BM2010.0027>
- Massot-Cladera, M., Abril-Gil, M., Torres, S., Franch, À, Castell, M., Pérez-Cano, F. 2014. Impact of cocoa polyphenol extracts on the immune system and microbiota in two strains of young rats. *British Journal of Nutrition*. 112(12): 1944-1954. <https://doi.org/10.1017/S0007114514003080>
- Mayer, A., E., Tillisch K., Gupta, A. 2015. Gut/brain axis and the microbiota. *Journal of Clinical Investigation*. 125(3): 926-938. <https://doi.org/10.1172/JCI176304>.
- Merino-Rivera, J.A., Taracena-Pacheco, S., Díaz-Greene, E.J., Rodríguez-Weber, F.L. 2021. Microbiota intestinal: "el órgano olvidado" / Gut microbiota: "the forgotten organ". *Acta Médica. Grupo Ángeles*. 19(1): 92-100. <https://dx.doi.org/10.35366/98577>.
- Mihatsch, W.A., Braegger, C.P., Decsi, T., Kolacek, S., Lanzinger, H., Mayer, B., Moreno, L.A., Pohlandt, F., Puntis, J., Shamir, R., Stadtmüller, U., Szajewska, H., Turck, D., van-Goudoever, J.B. 2011. Critical systematic review of the level of evidence for routine use of probiotics for reduction of mortality and prevention of necrotizing enterocolitis and sepsis in preterm infants. *Clinical Nutrition*. 31(1): 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2011.09.004>
- Mitsuoka, T. 1992. Intestinal flora and aging. *Nutrition Reviews*. 50(12): 438-446.
- Nagpal, R., Yadav, H., Marotta, F. 2014. Gut microbiota: The next-gen frontier in preventive and therapeutic medicine? *Frontiers in Medicine*. 1: 1-15. <https://doi.org/10.3389/fmed.2014.00015>
- Negrete-Lira, S. 2022. Repercusiones de la microbiota intestinal y la dieta en el desarrollo y maduración del sistema inmunológico en

ratas hembra y macho de la estirpe Wistar".
Tesis profesional (Química de Alimentos).
Universidad Nacional Autónoma de México,
UNAM. Facultad de Química. Ciudad de México,
México. <https://132.248.9.195/ptd2022/noviembre/0833114/Index.html>

- O'Mahony, S.M., Felice, V.D., Nally, K., Savignac, H.M., Claesson, M.J., Scully, P., Woznicki, J., Hyland, N.P., Shanahan, F., Quigley, E.M., Marchesi, J.R., O'Toole, P.W., Dinan, T.G., Cryan, J.F. 2014. Disturbance of the gut microbiota in early-life selectively affects visceral pain in adulthood without impacting cognitive or anxiety-related behaviors in male rats. *Neuroscience*. 277: 885-901. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2014.07.054>
- Opazo, M.C., Ortega-Rocha, E.M., Coronado-Arrázola, I., Bonifaz, L.C., Boudin, H., Neunlist, M., Bueno, S.M., Kalergis, A.M., Riedel, C.A. 2018. Intestinal microbiota influences non-intestinal related autoimmune diseases. *Frontiers in Microbiology*. 9 : Article ID 432. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00432>
- Oseni, S.O., Naar, C., Pavlović, M., Asghar, W., Hartmann, J.X., Fields, G.B., Esiobu, N., Kumi-Diaka, J. 2023. The molecular basis and clinical consequences of chronic inflammation in prostatic diseases: Prostatitis, benign prostatic hyperplasia, and prostate cancer. *Cancers*. 15(12): 3110. <https://doi.org/10.3390/cancers15123110>
- Ramiro-Puig, E., Pérez-Cano, F. J., Ramos-Romero, S., Pérez-Berezo, T., Castellote, C., Permanyer, J., Franch, À., Izquierdo-Pulido, M., Castell, M. 2007. Intestinal immune system of young rats influenced by cocoa-enriched diet. *The Journal of Nutritional Biochemistry*. 19: 555-565. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2007.07.002>
- Robles-Alonso, V., Guarner, F. 2013. Progreso en el conocimiento de la microbiota intestinal humana. *Revista Nutrición Hospitalaria*. 28: 553-557. <https://dx.doi.org/10.3305/nh.2013.28.3.6601>
- Ruiz-Iglesias, P., Estruel-Amades, S., Camps-Bossacoma, M., Massot-Cladera, M., Castell, M., Pérez-Cano, F. J. 2020. Alterations in the mucosal immune system by a chronic exhausting exercise

in Wistar rats. *Scientific Reports*. 10(1): 1-14.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-74837-9>

Shanahan, F. 2001. Inflammatory bowel disease: Immunodiagnostics, immunotherapeutics, and ecotherapeutics. *Gastroenterology*. 120(3): 622-635. <https://doi.org/10.1053/gast.2001.22122>

Stilling, R.M., Van-de-Wouw, M., Clarke, G., Stanton, C., Dinan, T.G., Cryan, J.F. 2016. The neuropharmacology of butyrate: The bread and butter of the microbiota-gut-brain axis? *Neurochemistry International*. 99: 110-132. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2016.06.011>

Strachan, D.P. 2000. Family size, infection, and atopy: The first decade of the "higiene hypothesis". *Thorax*. 55(1): 2-10. <https://doi.org/10.1136/thorax.55.suppl.1.s2>

Thabane, M., Simunovic, M., Akhtar-Danesh, N., Garg, A.X., Clark, W.F., Collins, S.M., Salvadori, M., Marshall, J.K. 2010. An outbreak of acute bacterial gastroenteritis is associated with an increased incidence of irritable bowel syndrome in children. *The American Journal of Gastroenterology*. 105: 933-939. <https://doi.org/10.1038/ajg.2010.74>

Tochitani, S., Ikeno, T., Ito, T., Sakurai, A., Yamauchi, T., Matsuzaki, H. 2016. Administration of non-absorbable antibiotics to pregnant mice to perturb the maternal gut microbiota is associated with alterations in offspring behavior. *PLoS ONE*. 11: 1-22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138293>

Torres-Castro, P., Grases-Pintó, B., Abril-Gil, M., Castell, M., Rodríguez-Lagunas, M., Pérez-Cano, F., Franch, A. 2020. Modulation of the systemic immune response in suckling rats by breast milk TGF- β 2, EGF and FGF21 Supplementation. *Nutrients*. 12(6): 1888. <https://doi.org/10.3390/nu12061888>

Vannucci, L., Stepankova, R., Kozakova, H., Fiserova, A., Rossmann, P., Tlaskalová-Hogenová, H. 2007. Colorectal carcinogenesis in germ-free and conventionally reared rats: Different intestinal environments affect the systemic immunity. *International Journal of Oncology*. 32: 609-617.

CARACTERÍSTICAS SOCIECONÓMICAS DE LA PRODUCCIÓN DE HABA EN LA REGIÓN NORORIENTAL DEL ESTADO DE PUEBLA, MÉXICO

**SOCIOECONOMIC CHARACTERISTICS OF BROAD BEAN PRODUCTION
IN THE NORTHEASTERN REGION OF THE STATE OF PUEBLA, MÉXICO**

Guadalupe Mora-Baez (1), Citlalli
Harris-Valle (2)

Instituto Tecnológico Superior de Tlatlauquitepec. Almoloni,
Tlatlauquitepec, Puebla México. C. P.73900.

Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla. Acuaco,
Zacapoaxtla, Puebla, México. C. P. 73680.

*Autor para correspondencia: [guadalupe.mora@tlatlauquitepec.
tecnm.mx](mailto:guadalupe.mora@tlatlauquitepec.tecnm.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-6147-0327>
<https://orcid.org/0000-0001-9353-0796>

FECHA DE RECEPCION 16/11/2023

FECHA DE REVISION 2/12/2024

FECHA DE PUBLICACION 20/05/2025

FOLIO: A11N72.25/988

Resumen

Determinar la importancia económica del cultivo de haba en cuatro municipios de la región nororiental de Puebla, y establecer el nivel de conocimiento de los productores acerca de los síntomas, métodos de control y daños ocasionados por la mancha chocolate. La aproximación: Se basó en la aplicación de encuestas semiestructuradas enfocadas en sistemas de producción, manejo fitosanitario y aceptación de productos bioplaguicidas. Con la información obtenida se construyó una base de datos en el paquete Microsoft® Excel. Con los datos obtenidos se observa la importancia y extensión de siembra, así como los problemas fitosanitarios que enfrenta la producción de haba en la región y finalmente la aceptación de productos bioplaguicidas para el control de mancha chocolate.

Limitaciones del estudio/implicaciones: Conocer y documentar la importancia del cultivo de haba en la región como fuente de sustento. Se determinó la importancia económica que tiene el cultivo de haba, los daños que ocasiona la infección por mancha chocolate y los sistemas de producción que se utilizan las familias productoras de la región.

Palabras clave: Sistemas de Producción, haba, bioplaguicidas, mancha chocolate.

Abstract

Determine the economic importance of cultivation in four municipalities in the northeastern region of Puebla, and establish the level of knowledge among producers regarding the symptoms, control methods, and damage caused by chocolate spot. Approach: Based on the application of semi-structured surveys focused on production systems, phytosanitary management, and acceptance of biopesticide products. The information obtained was used to build a database in Microsoft® Excel. The data obtained show the importance and extent of planting, as well as the phytosanitary problems facing bean production in the region and, finally, the acceptance of biopesticide products for the control of chocolate spot. Limitations of the study/implications: To understand and document the importance of bean cultivation in the region as a source of livelihood. The economic importance of bean cultivation, the damage caused by chocolate spot infection, and the production systems used by farming families in the region were determined.

Keywords: Production Systems, broad bean, biopesticides, chocolate stain.

Introducción

El haba es una de las leguminosas de mayor importancia en el mundo (Rojas-Tiempo, Díaz-Ruiz, Álvarez-Gaxiola, Ocampo-Mendoza, y Escalante-Estrada, 2012). Los principales países productores son China, Etiopía, Australia, Reino Unido, Alemania, Francia, Egipto y México. En cuanto a la exportación destacan el Reino Unido y Alemania, y en este contexto México se posiciona en octavo lugar, al enviar el 42 % de la producción a los Estados Unidos de Norte América (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2017).

En nuestro país el haba ocupa el quinto lugar de consumo per cápita. Posiblemente por sus propiedades nutricionales, donde se cultivan 13 415 ha en los estados de México, Puebla y Tlaxcala para consumo en verde, y 26 924 ha en Veracruz, Tlaxcala e Hidalgo y principalmente en Puebla donde se cultivan 16 083 ha para consumo en grano. El rendimiento nacional varía de 1.3 a 6.6 t·ha⁻¹ (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2019).

De la superficie cultivada en Puebla, 10 693 ha corresponden a el municipio de Libres, 2 330 ha a Teziutlán y 1 737 a Zacatlán; en menor proporción se encuentran Xitotetelco, Tlatlauquitepec, Zaragoza, Oriental y Cuyoaco con 720, 550, 470, 380 y 210 ha respectivamente, cuyo rendimiento promedio es de 780 kg·ha⁻¹ (SIAP, 2019). Esta especie es muy importante dentro del patrón de cultivos de la región nororiental del estado de Puebla, no obstante, aún no se ha desarrollado algún paquete tecnológico que considere el manejo integrado del cultivo, especialmente haciendo énfasis en el control de enfermedades.

El haba es una leguminosa de grano de estación fría que se produce en ambientes mediterráneos y templados, donde es común la pérdida de rendimiento asociada al estrés abiótico y biótico (Lake et al., 2019). Las plagas y enfermedades son un factor primordial que merma significativamente la producción de los cultivos (Martínez-Ruiz et al., 2016). En el

caso del haba la principal enfermedad es ocasionada por el hongo *Botrytis fabae* Sardiña, padecimiento conocido comúnmente como mancha chocolate (Gahukar, 2012). Los síntomas típicos de la infección por *B. fabae* son la presencia de manchas necróticas en tallos y hojas, considerada como la fase no agresiva; posteriormente, en la fase agresiva infecta flores y vainas (Espinal, Terrazas y Gimenez, 2010). Entre las principales consecuencias se ha detectado una reducción de hasta el 60 % de la producción (Churata, Huanca, Siles, y Turba, 2010).

La principal estrategia de control para éste patógeno es el uso de fungicidas, entre los que destacan Mancozeb, Folpet, Selix, Benomyl, etc. (Espinal et al., 2010), cuya toxicidad es alta, en la mayoría de los casos. Pueden ocasionar resistencia por parte del patógeno, daño en la salud del productor y consumidor, ser precursores del deterioro del ambiente, provocando alteraciones en aire, tierra, agua y animales (Calviello, Piccioni, Boninsegna, Tedesco, Maggiano, Serini y Palozza, 2006). Además del daño ambiental, el manejo de plagas puede aumentar los costos de producción debido a que constituye el 10 al 22 % de la inversión cuando esta se presenta (Legarreta- Ramírez y Jacobo-Cuéllar, 2002).

Por lo anterior, se considera importante documentar el conocimiento campesino acerca del manejo del cultivo de haba, especialmente en el control de la mancha chocolate, ya que, su experiencia, representa una de las mayores fuentes de información para la organización y funcionamiento de los sistemas establecidos en la producción agrícola tradicional de la región. Todo este conocimiento surge como respuesta a las necesidades básicas, del estilo de vida y de producción de los pobladores (Castro, 2020).

Si bien ya existen algunos estudios donde se ha reportado la importancia del conocimiento campesino (Gliessman, 2002), aún no se tiene discernimiento de las prácticas agrícolas del cultivo de haba en la región nororiental del estado de Puebla. Señalando de manera específica a los municipios de Libres, Zaragoza, Tlatlauquitepec y Zacapoaxtla, cuya aportación posiciona al estado entre uno

de los principales productores en México.

En este sentido, se aplicaron encuestas semiestructuradas enfocadas en sistemas de producción, manejo fitosanitario y aceptación de productos bioplaguicidas. Con base en la información recolectada se pretende establecer un manejo sustentable, y conocer las características que el agricultor considera para el establecimiento del cultivo. Al mismo tiempo se deja un registro para promover la conservación y propagación de semillas nativas, así como los de conocimientos locales de la región nororiental del estado de Puebla, México.

Aplicación de encuestas

Para la recolección de información se diseñó y aplicó una encuesta semiestructurada a 80 productores de haba seleccionados al azar de los municipios de Zaragoza, Zacapoaxtla, Libres y Tlatlauquitepec, todos pertenecientes al estado de Puebla, México, considerando a 20 productores por municipio. La encuesta abarcó características de los sistemas de producción agrícola, iniciando con la antigüedad de siembra, obtención selección y almacenado de semillas para el ciclo posterior, superficie establecida, incorporación o manejo de programas de fertilización, aspectos económicos (inversión destinada para el establecimiento y manejo por hectárea, rendimiento y los mercados a donde se comercializa el producto en grano o vaina). Del mismo modo, se incluyeron preguntas que permitieran generar un panorama sobre los conocimientos con respecto a la identificación de patógenos (específicamente de mancha chocolate), su control fitosanitario, pérdidas ocasionadas por presencia de enfermedades y, finalmente, se destacó la opinión sobre la aceptación e implementación de bioplaguicidas.

La selección de los municipios, fue de acuerdo al antecedente de producción en la región nororiental del estado. Las encuestas fueron aplicadas durante el mes de mayo de 2021. Con la información obtenida se construyó una base de datos en el paquete Microsoft® Excel, misma

que permitió hacer el análisis descriptivo mediante la elaboración de graficas de barras y cuadros.

Con base en la información recolectada en los cuatro municipios, se encontró que la antigüedad del cultivo de haba en la mayoría de los productores encuestados, es de más de 10 años, lo cual se relaciona con la posición que tiene el estado como uno de los principales productores (Rojas-Tiempo, Díaz-Ruiz, Álvarez-Gaxiola, Ocampo-Mendoza & Escalante-Estrada, 2012). Esto indica que esta especie ha formado parte del patrón de cultivos desde hace al menos una década y, como se observa en la Figura 1, se siguen sumando productores de manera paulatina; aunque cabe destacar que la antigüedad del cultivo en el municipio de Libres se encuentra en el intervalo de cinco a más años.

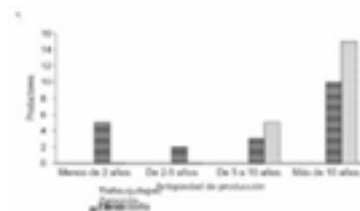


Figura 1. Antigüedad de producción de haba en cuatro municipios de la región nororiental de Puebla, México. Las barras indican el número de productores que tienen 2, de 2 a 5, de 5 a 10 y más de 10 años dedicándose al cultivo de haba.

De acuerdo con la información obtenida, la producción para consumo familiar se lleva a cabo principalmente en los municipios de Zaragoza y Zacapoaxtla, mientras que para la venta a nivel local se realiza en los municipios de Zacapoaxtla, Zaragoza y Tlatlauquitepec. Libres es el municipio que no comercializa a nivel regional, en tanto que Tlatlauquitepec es el que tiene mayor venta, seguido de Zaragoza y Libres. Es importante señalar que la producción para venta nacional únicamente se realiza en el municipio de Libres (Figura 2).

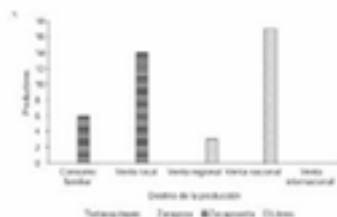


Figura 2. Principales mercados de la producción de haba en cuatro municipios de la región nororiental de Puebla, México. Las barras representan el número de productores que destinan su producción al consumo familiar y venta local, regional o nacional.

Pérez (2014) señala que el haba es la séptima leguminosa de grano más importante en el mundo y se consume tanto en vaina verde como en grano seco, para la región de estudio es una especie relevante del patrón de cultivos desde hace varios años, su venta en diferentes mercados genera ingresos para las familias de la zona, especialmente para el municipio de Libres donde la mayoría de los productores encuestados mencionaron que la producción de haba es su principal fuente de ingresos (Cuadro 1). No obstante, para los productores de Tlatlauquitepec, Zaragoza y Zacapoaxtla esta actividad agrícola no es su fuente primaria de ingresos debido a bajos rendimientos y a la presencia de enfermedades, lo cual coincide con lo reportado por Doussoulin, Andrade y Acuña (2015) quienes sugieren que la presencia de enfermedades afecta directamente en el rendimiento de haba.

Tlatlauquitepec		Zaragoza		Zacapoaxtla		Libres	
¿La producción de haba es su fuente principal de ingresos?							
a. Sí	15	15	15	15	15	15	15
b. No	5	5	5	5	5	5	5
¿Qué tipo de semilla de haba utiliza?							
a. Criolla	15	15	15	15	15	15	15
b. Comercial	5	5	5	5	5	5	5
¿Desde cuándo la semilla utilizada para la cosecha?							
a. Cosecha anterior	15	15	15	15	15	15	15
b. Compra a otro productor	5	5	5	5	5	5	5

Tabla 1. Importancia de cultivo como fuente de ingreso, y origen de la semilla que se utiliza en la siembra de haba, en cuatro municipios de la región nororiental de Puebla, México.

Para el establecimiento del cultivo, del 85 al 100 % de los productores utilizan semilla criolla, y únicamente el 5 % (que corresponde a los municipios de Zaragoza y Zacapoaxtla) adquieren algún tipo de semilla comercial. Lo anterior es

evidencia de que los productores siguen realizando un proceso de selección e intercambio de materiales, de acuerdo con los conocimientos tradicionales, perfeccionado mediante la experimentación empírica, lo cual contribuye con la conservación in situ de esta especie (Díaz-Bautista, Herrera-Cabrera, Ramírez-Juárez, Aliphath-Fernández, y Delgado-Alvarado, 2008).

Díaz-Bautista et al. (2008) mencionan que Puebla es el mayor productor de semilla de haba, donde el 93 % de los campesinos consideran que la sanidad de semilla es el principal criterio en la selección, y el 55 % consideran importante tanto la sanidad como el tamaño de la semilla. Además de las consideraciones anteriores, Pérez-López et al. (2015) sugieren que la expresión fenotípica (longitud de tallo, ramas por planta, vainas por plantas, semillas por vaina y peso de 100 semillas) se debe considerar en el proceso de selección y almacenamiento.

Una característica acerca del origen de material de propagación en los municipios de Tlatlauquitepec, Zaragoza y Zacapoaxtla es que los productores adquieren la semilla con otros productores debido a que venden el total de la cosecha. En el caso del municipio de Libres todos los productores encuestados mencionaron que la semilla que propagan es de su cosecha anterior, lo que permite la conservación de materiales in situ, representando así una oportunidad de mantener y salvaguardar los recursos locales, ya que contrasta con la agricultura moderna que ha reducido la diversidad genética de las regiones (Duc et al., 2010). En un estudio realizado por Rojas-Tiempo et al. (2012) se menciona que, en las comunidades que integraron el área de estudio, se utilizan dos tipos de haba identificados por el tamaño de semilla, conocidas por los productores como tarragona y cochinera que, de acuerdo con la clasificación propuesta por Cubero (1974) corresponden a las variedades minor y equina, respectivamente. En comunicación personal, los productores mencionaron que el tipo de semilla que utilizan es la tarragona, cuyo tamaño es mayor en comparación con cochinera. En este sentido la región nororiental del estado de Puebla se caracteriza por el uso de los cultivares

locales como son tarragona, parraleña y cochinera (Herrera, Alvarado, Cabrera, Hernández, & Guevara, 2020).

La superficie sembrada en Tlatlauquitepec y Zaragoza varía de 1 a 2 ha, mientras que la mayoría de productores de Zacapoaxtla cultivan haba en menos de 1 ha, esta información está relacionada con el uso de la producción exclusiva para autoconsumo y del mismo modo de los sistemas establecidos, ya que son producciones que tienen escaso manejo agronómico. El 80 % de los productores del municipio de Libres cultivan de 2 a 4 ha. Los únicos productores que establecen más de 4 ha se encuentran en los municipios de Zaragoza y Libres (Figura 3).

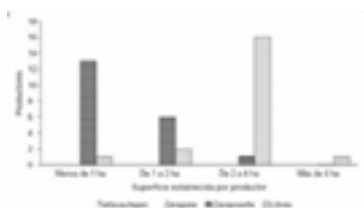


Figura 3. Superficie establecida con haba por productor en cuatro municipios de la región nororiental de Puebla, México. Las barras representan la cantidad de productores que cultivan haba en 1, de 1 a 2, de 2 a 4 y más de 4 ha.

Los mayores rendimientos de haba por hectárea se registraron en el municipio de Libres, que varían de 200 a 300 kg, seguido de Tlatlauquitepec, donde se produce de 150 a 250 kg. Zaragoza obtiene de 100 a 200 kg, siendo el municipio de Zacapoaxtla quien reporta el rendimiento más bajo (Figura 4), el cual es menor a los 300 kg reportados por Rojas et al. (2012), quienes evaluaron un sistema de producción de haba, pero con la implementación de paquetes tecnológicos de fertilización, control de enfermedades y plagas.

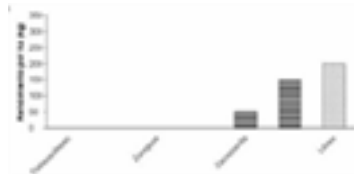


Figura 4. Rendimiento mínimo y máximo de haba en cuatro municipios de la región nororiental de Puebla, México.

Se encontró que hay variación en cuanto a la inversión por hectárea cultivada de haba al comparar los municipios estudiados, en Zaragoza, Zacapoaxtla y Tlatlauquitepec la inversión por ha es menor a \$ 2500.00, en contraste con el municipio de Libres donde la inversión supera los \$ 4000.00 (Figura 5). Dicha inversión es proporcional al rendimiento por superficie cultivada como se observó anteriormente.

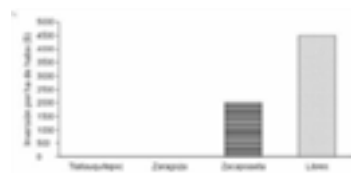


Figura 5. Inversión por hectárea cultivada de haba en cuatro municipios de la región nororiental de Puebla, México.

En los municipios de Tlatlauquitepec y Libres los productores utilizan algún producto para la desinfección de la semilla de haba, caso contrario de Zaragoza y Zacapoaxtla donde no realizan esta actividad, lo cual podría contribuir al efecto negativo en los rendimientos por la presencia de hongos y bacterias (Orozco y Zúñiga, 2020).

La mancha de chocolate se considera entre las principales enfermedades del cultivo, tanto en México como en otros países (Torres, Roman, Avila, Satovic, Rubiales, Sillero, y Moreno, 2006). En relación con el conocimiento de esta enfermedad, el 91 % de los productores conoce los síntomas que causa este patógeno en las plantas. Es por ello que, en los municipios de Tlatlauquitepec, Zacapoaxtla y Libres del 75 al 85 % de los productores entrevistados llevan a cabo tratamientos preventivos, caso contrario

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaracion de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Referencias

- Calviello, G., Piccioni, E., Boninsegna, A., Tedesco, B., Maggiano, N., Serini, S., & Palozza, P. (2006). DNA damage and apoptosis induction by the pesticide Mancozeb in rat cells: involvement of the oxidative mechanism. *Toxicology and applied pharmacology*, 211(2), 87-96.
- Castro, A., Lavarello Herbin, A., Córdoba, J. A., Perez, R. A., Motta, L. I., & Cavanna, F. L. (2020). Tamberos familiares del oeste del conurbano bonaerense: sus lógicas de producción, reproducción y sus estrategias pluriactivas. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 119.
- Churata, C. E., Huanca, M., Siles, E. T., y Turba, A. G. (2010). Evaluación De La Actividad Biocontroladora De *Trichoderma inhamatum* Cepa Bol 12 Qd, Frente a *Botrytis fabae*, Causante De La Mancha Chocolate En Cultivos De Haba (*Vicia faba*). *BIOFARBO* 18. *BIOFARBO*, 18(1), 13-30.
- Díaz-Bautista, Maximino, Herrera-Cabrera, B. Edgar, Ramírez-Juárez, Javier, Aliphath-Fernández, Mario y Delgado-Alvarado, Adriana (2008). Conocimiento campesino en la selección de variedades de haba (*Vicia faba* L.) en la Sierra Norte de Puebla México. *Interciencia*, 33(8), 610-615. ISSN: 0378-1844. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933810>
- Doussoulin, H., Andrade, N., y Acuña, R. (2015). Influencia de la fecha y densidad de siembra sobre el desarrollo de patógenos presentes en cultivares de haba (*Vicia faba* L.) de crecimiento determinado. *Agro Sur*, 43(1), 25-30. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2015.v43n1-04>.
- Duc, G., Bao, S., Baum, M., Redden, B., Sadiki, M., Suso, M. J., ... & Zong, X. (2010). Diversity maintenance and use of *Vicia faba* L. genetic resources. *Field Crops Research*, 115(3), 270-278.
- Espinal Churata, C. R., Terrazas Siles, L. E. A., y Gimenez Turba, A. A. (2010). Evaluación de la actividad biocontroladora de *Trichoderma inhamatum* (cepa BOL-12QD) frente a *Botrytis fabae*, causante de la mancha chocolate en cultivos de haba (*Vicia Faba*).
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). Producción mundial de haba. Consultado: 03/01/2019 en www.fao.org.
- Gahukar, R. T. (2012). Evaluation of plant-derived products against pests and diseases of medicinal plants: a review. *Crop Protection*, 42, 202-209.
- Gliessman, S. R. (2002). Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible. *Catie*.

Herrera, P. B. F., Alvarado, A. D., Cabrera, B. E. H., Hernández, J. I. O., y Guevara, M. L. (2020). Percepción del consumo y uso de haba: aporte nutricional en Ciudad Serdán, Puebla, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 17(1), 1-16.

Laura Castro, D. Á. (2020). Eficiencia del sistema de riego por solarización a diferentes profundidades en el cultivo de haba (Vicia faba L.) en la provincia de Acobamba.

Lake, L., Godoy-Kutchartt, D. E., Calderini, D. F., Verrell, A., & Sadras, V. O. (2019). Yield determination and the critical period of faba bean (Vicia faba L.). *Field Crops Research*, 241, 107575.

Legarreta, M. R. R., y Cuéllar, J. L. J. (2002). Impacto ambiental del uso de plaguicidas en huertos de manzano del noroeste de Chihuahua, México. *Revista mexicana de Fitopatología*, 20(2), 168-173.

Leng, P., Zhang, Z., Pan, G., & Zhao, M. (2011). Applications and development trends in biopesticides. *African Journal of Biotechnology*, 10(86), 19864-19873.

Martínez-Ruiz, F. E., Cervantes-Díaz, L., Aíl-Catzím, C. E., Hernández-Montiel, L. G., Sánchez, C. L. D. T., y Rueda-Puente, E. O. (2016). Hongos fitopatógenos asociados al tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) en la Zona Árida del noroeste De México: la importancia de su diagnóstico. *European Scientific Journal*, 12(18).

Nava-Pérez, E., García-Gutiérrez, C., Camacho-Báez, J. R., y Vázquez-Montoya, E. L. (2012). Bioplaguicidas: una opción para el control biológico de plagas. *Ra Ximhai*, 8(3), 17-29.

Orozco, A. Z., & Zúñiga, I. B. (2020). Evaluación de tres productos desinfectantes sobre semillas de maíz y cebada para la producción en la tecnología de Forraje Verde Hidropónico. *Repertorio Científico*, 23(2), 63-75.

Pérez López, D. D. J., González Huerta, A., Franco Mora, O., Rubí Arriaga, M., Ramírez Dávila, J. F., Castañeda Vildózola, Á., y Aquino Martínez, J. G. (2014). Aplicación de métodos multivariados para identificar cultivares sobresalientes de haba para el estado de México, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(2), 265-278.

Pérez López, D. D. J., González Huerta, A., Rubí Arriaga, M., Franco Mora, O., Franco Martínez, J. R. P., & Padilla Lara, A. (2015). Análisis de 35 cultivares de haba por su producción de vaina verde y otros componentes del rendimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1601-1613.

Rojas-Tiempo, J., Díaz-Ruiz, R., Álvarez-Gaxiola, F., Ocampo-Mendoza, J., y Escalante-Estrada, A. (2012). Tecnología de producción de haba y características socioeconómicas de productores en Puebla y Tlaxcala. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(1), 35-49.

SIAP, Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. (2019). Estadísticas de los cultivos. Consultado: 04/10/2019 en www.siap.sagarpa.org.mx.

Torres, A. M., Roman, B., Avila, C. M., Satovic, Z., Rubiales, D., Sillero, J. C., & Moreno, M. T. (2006). Faba bean breeding for resistance against biotic stresses: towards application of marker technology. *Euphytica*, 147(1), 67-80.

DE LA BEBIDA ANCESTRAL A DULCE NUTRITIVO: ELABORACIÓN DE GOMITAS DE PULQUE

FROM AN ANCESTRAL BEVERAGE TO A NUTRITIOUS CANDY: THE MAKING OF PULQUE GUMMIE

Lizzeth Hernández-Carnalla*, Joseph E. Solano-Baez, Guadalupe Vargas de la Rosa, Alan Marín-Flores, Valdemar Tirado Cruz

<https://orcid.org/0000-0001-5393-9212>
<https://orcid.org/0009-0007-8814-4250>
<https://orcid.org/0009-0009-0787-1195>
<https://orcid.org/0009-0008-9085-0709>

Recibido: 19 febrero 2025
Revisado: 30 junio 2025
Publicado: 30 de agosto 2025

Instituto Tecnológico Superior de Atlixco, C. Heliotropo No.1201, Unidad 8 Norte Nueva Xapatlalco, Vista Hermosa, Atlixco, Puebla.
lizzeth.hernandez@itsatlixco.edu.mx; lg210479@itsatlixco.edu.mx;
lg210519@itsatlixco.edu.mx; lg210503@itsatlixco.edu.mx

Resumen

El pulque, una bebida ancestral de origen mesoamericano, ha sido parte fundamental de la cultura y tradición de diversas comunidades a lo largo de la historia. En la actualidad, su potencial no solo se limita al consumo líquido, sino que se ha explorado su uso en la elaboración de nuevos productos alimenticios. En este sentido, el presente artículo aborda el proceso de transformación del pulque en un dulce nutritivo mediante la elaboración de gomitas. Se analiza su valor nutricional, beneficios para la salud y el impacto que su incorporación en la industria alimentaria puede tener, destacando la sostenibilidad y la innovación de este producto tradicional. Esta revisión proporciona una perspectiva sobre cómo la tradición y la modernidad se fusionan para crear productos novedosos a partir de un alimento ancestral.

Palabras clave: : Pulque, Solidificación, Antioxidantes, Fibra, Gomita.

Abstract

Pulque, an ancestral beverage of Mesoamerican origin, has been a fundamental part of the culture and tradition of various communities throughout history. Today, its potential is not limited to liquid consumption, but has also been explored for use in the development of new food products. In this regard, the present article discusses the process of transforming pulque into a nutritious sweet by making gummies. It analyzes its nutritional value, health benefits, and the impact that its incorporation into the food industry can have, highlighting the sustainability and innovation of this traditional product. This review provides a perspective on how tradition and modernity merge to create novel products from an ancestral food.

Keywords: Pulque, Solidification, Antioxidants, Fiber, Gum.

INTRODUCCIÓN

El pulque, una de las bebidas más emblemáticas de México, tiene sus raíces profundamente arraigadas en la historia prehispánica del país. Su origen se remonta a más de 2,000 años, cuando las civilizaciones mesoamericanas, como los mexicas y los zapotecas, comenzaron a aprovechar la savia del maguey (Agave) para producir esta bebida fermentada. En ese entonces, el pulque no solo tenía un valor nutritivo, sino también un fuerte componente ritual y religioso. Era considerado un "alimento de los dioses", principalmente consumido por la élite, los sacerdotes y los guerreros, en ceremonias sagradas y festividades.

Con la llegada de los conquistadores españoles en el siglo XVI, el pulque continuó siendo una bebida de gran importancia cultural, aunque con algunas transformaciones. Durante la época colonial, su consumo se amplió a diferentes estratos sociales, pero fue hasta el siglo XIX que el pulque se consolidó como una bebida popular entre la mayoría de la población mexicana. El pulque no solo se mantenía como una bebida social, sino también como un producto económico clave, sobre todo en las regiones del altiplano central, como Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y Morelos.

A lo largo del tiempo, el pulque ha sido testigo de diversos altibajos en cuanto a popularidad, especialmente debido a la llegada de bebidas industrializadas. Sin embargo, en las últimas décadas ha experimentado un resurgimiento gracias a iniciativas que buscan revitalizar su consumo y promoverlo como parte integral de la cultura mexicana, en especial en un contexto de creciente interés por la gastronomía tradicional y la sustentabilidad.

Hoy en día, el pulque se encuentra en una etapa de reinvención, con nuevos productos como las gomitas de pulque, que buscan acercar esta bebida ancestral a un público más joven, a la vez que conservan su esencia y promueven su historia y valor cultural.

El pulque, bebida ancestral de México, es una fuente rica en diversos nutrientes beneficiosos para la salud. Este fermentado, elaborado a partir de la savia del maguey, es especialmente alto en proteínas, que provienen de sus aminoácidos esenciales. Además, contiene una amplia variedad de vitaminas, como la vitamina B2 (riboflavina), B3 (niacina), B5 (ácido pantoténico) y pequeñas cantidades de vitamina C. Es una excelente fuente de minerales como el calcio, magnesio, fósforo y potasio, esenciales para la salud ósea, cardiovascular y muscular. Asimismo, el pulque es bajo en calorías y grasas, lo que lo convierte en una opción nutritiva y ligera. Su contenido de fibra, debido a la pulpa que conserva durante el proceso de fermentación, también contribuye a la salud digestiva. Sin duda, el pulque no solo es un referente cultural, sino también una bebida con valor nutricional importante en la dieta mexicana.

Sin embargo, la modernidad y la globalización han puesto en riesgo su consumo. La competencia con otras bebidas, así como la pérdida de conocimiento sobre las técnicas de producción, han llevado a que el pulque se vea relegado en el ámbito gastronómico. Es en este contexto donde surge la necesidad de innovar y revitalizar el interés por el pulque, no solo para conservar su legado, sino también para hacerlo accesible a nuevas generaciones.

Con el objetivo de acercar el pulque a un público más amplio, se crearon las gomitas de pulque, una alternativa innovadora que busca capturar la esencia de esta bebida milenaria en un formato atractivo y divertido, especialmente para las nuevas generaciones. A través de esta propuesta, no solo se reinterpreta el pulque, sino que se ofrece una experiencia sensorial única, adaptada a los gustos actuales, sin perder su identidad original.

Las gomitas son confites, golosinas o caramelos masticables blandos o suaves que se elaboran con un agente gelificante que les proporciona una textura elástica y gomosa a través de la mezcla de diversas materias primas como; grenetina, glucosa, pulpa o jugo de fruta, sacarosa, aditivos alimentarios permitidos por la

normatividad oficial mexicana como son saborizantes naturales o sintéticos, colorantes, conservadores, gelificantes, edulcorantes, espesantes, texturizantes, entre otros (Brown, 2022).

Esta transformación del pulque también abre un espacio para reflexionar sobre la sustentabilidad y el uso responsable de los recursos naturales. Al promover el consumo del maguey y sus derivados, se contribuye a la conservación de estas plantas emblemáticas y al fortalecimiento de las comunidades que dependen de su cultivo. De este modo, el proyecto no solo amplía el panorama gastronómico, sino que fomenta prácticas que valoran el respeto por el medio ambiente y la economía local.

En conclusión, el pulque, con su profunda historia y simbolismo cultural, tiene el potencial de reinventarse y mantenerse vigente en la actualidad. Las gomitas de pulque representan un ejemplo claro de cómo la innovación puede conectar el pasado con el presente, celebrando la riqueza cultural de México, mientras abre nuevas formas de disfrutar esta bebida ancestral. Este proyecto no solo busca deleitar el paladar, sino también educar y generar conciencia sobre la importancia del pulque, invitando a todos a ser parte de su legado.



Fuente: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-pulque-la-bebida-prehispanica-de-mexico>

DESARROLLO

Actualmente, en el Laboratorio de Gastronomía del Instituto Tecnológico Superior de Atlixco se están desarrollando gomitas de pulque, el cual es una bebida prehispánica tradicional mexicana

utilizada para los dioses, está puede ser obtenida en muchos lugares y zonas de México, para nuestro proyecto se obtuvo en Zacatlán. Este es extraído de la penca de maguey, este proceso se lleva a cabo desde el corte para el impedimento del crecimiento del quito (zona central del maguey) rascando un poco para crear una olla no tan profundo en el corazón del Maguey. Se tapa con mucho cuidado, se extrae la aguamiel alrededor de 2 veces por día y una vez extraído el agua miel es colocado en el tinacal donde se fermentará y saldrá el pulque. Una vez obtenido el pulque, procedemos con la elaboración de gomitas, vertemos el pulque en un recipiente de acero, y se añade carboximetilcelulosa. Por otro lado, en un recipiente aparte, hidratamos el pulque con grenetina. La mezcla se calienta hasta que la grenetina se disuelva por completo. Después, combinamos ambas preparaciones para dar forma a las gomitas de pulque. Dejar a 70°C en un tiempo de 10 a 15 minutos, apagamos el fuego y dejamos reposar. Engrasamos los moldes y colocarlos en una charola para tener mejor control de movimiento. Terminamos en verter el líquido en los moldes, tapar con vitaflim y colocar en el refrigerador alrededor de 24 horas.

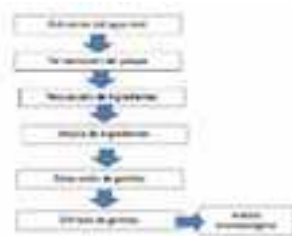


Figura 1 En este diagrama presentamos se muestra como se hizo la formación y elaboración de las gomitas de pulque.

Desarrollo de formulación de las gomitas de pulque, Una vez obtenido el pulque, procedemos con la elaboración de gomitas, vertemos 750 ml de pulque en un recipiente de acero, y se añade 2 g de carboximetilcelulosa, un compuesto que ayudará a darle la textura deseada. Por otro lado, en un recipiente aparte, hidratamos los 250 ml restantes de pulque con 10 g de grenetina. La mezcla se calienta a 70°C hasta que la grenetina se disuelva

por completo. Después, combinamos ambas preparaciones para dar forma a las gomitas de pulque, creando así un dulce nutritivo que conserva los beneficios de esta bebida tradicional mexicana. Se deja reposar la mezcla durante 10-15 minutos. Luego, se engrasan los moldes y se colocan en una charola para un mejor control de movimiento. Se vierte la mezcla en los moldes, se tapa con vitaflim y se coloca en el refrigerador durante aproximadamente 24 horas.



Figura 2. Preparación de Gomitas de Pulque

Fuente: elaboración propia.



Figura 3. Empacado de gomitas

Fuente: elaboración propia

Análisis Bromatológicos de la formulación de gomitas de pulque. Se realizaron los siguientes análisis a la formulación de gomitas de pulque: humedad con el NMX-F-083-1986, de Cenizas de acuerdo con la NMX-F-607-NORMEX-2013, de Fibra cruda NMX-F-613-NORMEX-2003, Proteína, Calorías y Carbohidratos con las tablas de composición nutricional. En la tabla 1 se observa un incremento considerable del contenido de proteína.

Tabla 1. Pruebas fisicoquímicas de la formulación de gomitas de pulque

Tipo de análisis	Método de análisis	Resultado	Unidad
Humedad	NMX-F-083-1986	67.83	g/100g
Cenizas	NMX-F-607-NORMEX-2013	24	g/100g
Fibra cruda	NMX-F-613-NORMEX-2003	24	g/100g
Proteína	Tabla 1a	5.36	g/100g
Calorías	Composición nutricional	233	Kcal/100g
Carbohidratos	Tabla 1a	81.33	g/100g

*Muñoz, C. M. (2022). Composición de alimentos 2da Edición. Editorial Mc Graw Hill. Pp.211.

Con respecto al análisis sensorial se elaboró gomitas de pulque, a cada panelista se le dotó de una boleta con indicaciones para la prueba de la escala hedónica de 5 puntos (1 me disgusta y 5 me gusta mucho) y se le dio a probar la muestra, se emplearon aproximadamente 10 gramos de gomitas. La evaluación se llevó a cabo 100 panelistas no entrenados del Instituto Tecnológico Superior de Atlixco. El promedio general de los 5 parámetros evaluados fue de 3.8, lo que muestra una opinión cercana a “me gusta moderadamente”. El parámetro mejor evaluado fu el olor, sabor y el color que se encuentra en “me gusta mucho”. Esto se debe a que la formulación de alimento tiene un color, sabor y un olor agradable, esto debido a que sigue manteniendo sus propiedades, asimismo la apariencia fue de “me gusta moderadamente” sin embargo, la textura obtuvo una puntuación baja, ya que los para los panelistas no fue de su agrado, por lo que en este parámetro tendríamos una área de oportunidad.

Conclusiones

En diversas regiones de México, la tradición del pulque sigue vigente como parte esencial del patrimonio gastronómico y cultural. Su elaboración artesanal ha perdurado a lo largo del tiempo, gracias a la transmisión de conocimientos entre generaciones, quienes han mantenido intactas las técnicas de extracción y fermentación. La innovación gastronómica ha permitido la transformación de este producto tradicional en gomitas de pulque, al combinar la riqueza histórica y cultural de esta bebida ancestral con técnicas de elaboración modernas.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto TECNM Campus Atlixco por permitirnos desarrollar este proyecto dentro de sus instalaciones, así como a las estudiantes de la Licenciatura en Gastronomía, por su colaboración, a aquellos autores que han dedicado tiempo y esfuerzo a la investigación sobre este tema.

Referencias

- Brown, L. y Green, M. (2021). Análisis de propiedades de textura en gomitas. *Revista de ciencia y tecnología de los alimentos*, 58(4), 1234-1245.
- García, M., C Hernández, J. (2023). Contenido mineral y salud ósea: El papel de las bebidas tradicionales mexicanas. *Revista de investigación de huesos y minerales*, 38(1), 45-55.
- García, M. (2023). El resurgimiento del pulque: patrimonio cultural y prácticas modernas. *Revista de Estudios Mexicanos*, 25(2), 112-129.
- González, A. (2015). *El pulque en la cultura mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- López, M. (2012). *El pulque: Bebida ancestral*. Fondo de Cultura Económica.
- González, L., C Martínez, A. (2021). *Etiquetado nutricional: Implicaciones para la salud pública**. Ediciones Salud.
- García Rivas, H. (2016). *Cocina prehispánica mexicana*. (1er ed.). PANORAMA.
- Hernández, T., Ramírez, C., C Pérez, J. (2023). Alergias alimentarias: Importancia del etiquetado claro. *Editorial Nutrición*.
- Martínez, R., C Torres, A. (2022). *Regulación alimentaria en México: Retos y oportunidades*.
- Johnson, A. (2024). Gomitas funcionales: Tendencias e innovaciones. *Revista de ciencias de la confitería*, 12 (3), 45-56.
- Medina Mendoza, C. Roldan Cruz, E. Y Vazquez Jahuey, M. (2022) Características Físicoquímicas, microbiológicas y organolépticas del aguamiel y pulque del alto mezquita, hidalgo. *Agricultura sociedad y Desarrollo*. Vol. 21(3) <https://www.revista-asyd.org/index.php/asyd/index>
- Méndez, R. (2009). *Características y propiedades del pulque*. Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Martínez, A., C López, R. (2020). Propiedades antioxidantes y antiinflamatorias de las bebidas fermentadas tradicionales. *Química de los Alimentos*, 307, 125564.
- Molina, D., Rivera, A. y Hernández, M. (2022). Efectos probióticos del pulque tradicional mexicano: una revisión. *Revista de Salud Gastrointestinal*, 15(4), 300-310.
- Molinero, D. (2021). *Pulque y cultura prehispánica: La bebida sagrada de Mesoamérica*. Perspectivas históricas sobre alimentos y

bebidas, 9(1), 45-60.

Muñoz, Z. (2012). Diccionario Enciclopédico de la Gastronomía Mexicana. (1er ed). Larousse. www.larousse.com.mx

Rojas, A. (2019). Rituales y sociedad: El papel del pulque en las religiones mesoamericanas. Revisión de civilizaciones antiguas, 34(3), 76-90.

Ramos, L., Vargas, M., C Gómez, P. (2021). Fibra dietética y su impacto en el metabolismo de la glucosa: conocimientos de las bebidas tradicionales.

Metabolismo, 112, 154-162.

Sánchez, J. (2022). El pulque en la época colonial: adaptación y continuidad. Revista de Historia Latinoamericana, 18(4), 88-102.

Smith, R. (2023). La evolución de las gomitas: una perspectiva global. Revista internacional de dulces, 29(2), 67-82.

Smith, J. (2020). Comprender las texturas de los dulces: la ciencia detrás de las gomitas. Prensa de ciencias de los alimentos. En el caso de artículos científicos específicos.

políticos en la Universidad Autónoma de Puebla, 1971-1980", en Musotti S. y Urrego A. (eds.), Las izquierdas latinoamericanas y sus Relaciones Internacionales (pp. 503-527). Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Investigaciones Históricas.

Tirado, V. G. (2017). "Testimonios sobre un día difícil: el 1 de mayo de 1973 en la UAP, Puebla (México)", en Historia, Voces y Memoria, revista del Programa de Historia Oral, (pp. 35-47). Instituto interdisciplinario de Estudios en América Latina, Filo: UBA, No. 10, 6 de abril,.

DEGLUCIÓN ATÍPICA: UN EFECTO DEL BIBERÓN

ATYPICAL SWALLOWING: AN EFFECT OF BOTTLE FEEDING

Esther Vaillard Jiménez

Facultad de Estomatología. Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla

Calle Lázaro Cárdenas Num 61-A.
Col Bello Horizonte C.P 72730
La trinidad, Cuautlancingo, Puebla
Teléfono: 22 23 25 28 89

*Autor de correspondencia: esther.vaillard@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3873-7740>

Año 11 No. 32

Recibido: 2/octubre/2024

Revisado: 30/junio/2025

Publicado: 30/Agosto/2025

FOLIO A11N71.25/987

Resumen

El uso del biberón se le relaciona como una forma de alimentación en la primera infancia. Sus efectos sobre el riesgo de caries, de generación de maloclusiones por promover patrones alterados de la succión y deglución que derivan en hábitos deformantes del complejo estomatognático y el riesgo y consecuencias del agresivo patrón cariogénico que genera son de gran importancia. Pocas veces son identificados los patrones alterados de la deglución y muchas veces se ignora su asociación con dislalias. El desarrollo de praxias estomatológicas correctas, entendidas estas como memoria del movimiento de cada función de la boca, se establece a partir de la alimentación al seno materno; el uso de biberones y chupones provocan un empuje lingual anormal que se apoya en los dientes anterosuperiores y los empuja hacia adelante con un efecto deformante de la cara.

Palabras clave: Deglución atípica, alimentación, Biberón, mal oclusión

Abstract

The use of the bottle is related to it as a form of feeding in early childhood. However, its effects on the risk of caries, the generation of malocclusions by promoting altered patterns of sucking and swallowing are important. This lead to deforming habits of the stomatognathic complex and the risk and consequences of the aggressive cariogenic pattern that it generates. Altered swallowing patterns are rarely identified, and their association with dyslalias is often ignored. The development of correct stomatological praxis, understood as memory of the movement of each function of the mouth, is established from feeding to the mother's breast; The use of bottles and pacifiers causes an abnormal tongue thrust that rests on the anterior superior teeth and pushes them forward with a deforming effect on the face.

Keywords. Atypical swallowing, feeding, bottle, malocclusion.

El biberón es conocido ampliamente por uno de sus grandes efectos: el cariogénico. Sin embargo, tiene otros efectos menos conocidos y de igual importancia. Tal como el potencial como generador de mal oclusiones pues estimula el aprendizaje de patrones deglutivos anormales, predisponentes a la aparición de hábitos orales nocivos que alteran el crecimiento craneofacial.

Las relaciones funcionales de la oclusión, la emisión de la palabra y afecta los aspectos psicológicos de los individuos. Las primeras experiencias con la alimentación tienen repercusiones importantes en la vida de las personas. Pueden significar una forma de aprender a buscar la gratificación oral como una forma compulsiva de reaccionar ante situaciones que propone la vida en sociedad. Lo que evidentemente, en el terreno de lo estomatológico, es posible detectar el empuje lingual como detonador de una serie de alteraciones funcionales.

Los primeros fabricantes de los chupones de goma trataron de seguir el modelo del pezón erecto de la madre en el momento de amamantar, sin considerar su anatomía durante la función. Muchas veces el tamaño de los chupones resulta grande para la cavidad oral de los neonatos y lactantes menores, para los lactantes mayores resultan de tamaño insuficiente.

Existen muchos casos de recién nacidos que no son lactados con seno materno y necesariamente se recurre al uso del biberón como una forma de ingesta que no reúne todas las ventajas de la alimentación que la naturaleza diseñó para los mamíferos. El uso malentendido del biberón es generado por la aprensión de las madres modernas, que evitan por cualquier medio que el bebé lllore. Así la madre reacciona ante manifestaciones de cualquier incomodidad, como una forma de demandar alimento, lo que tiene como resultado un patrón de aprendizaje temprano en el cual se asocia la gratificación oral cuando se enfrenta a cualquier problema de la vida. El ser humano es un mamífero que, al nacer, tiene como primer reflejo la orientación que permite

al recién nacido a encontrar el pezón de su mamá. El acto de mamar requiere un alto grado de complejidad, experiencia y entrenamiento.

Se piensa que el acto de succionar en ellos tiene como fin obtener una propiocepción neuromuscular de las estructuras de la boca. Esta conducta se puede reforzar por la sensación placentera de

los movimientos rítmicos (Barnett, 1978). Una de las principales ventajas de la alimentación con seno materno es su potencial estimulante para el crecimiento de las estructuras orales y de la esfera emocional. El lactante debe activar con gran intensidad la musculatura de inserción de la mandíbula para poder exprimir exitosamente la glándula mamaria. Esta sobrecarga funcional durante los primeros meses de vida significa la posibilidad de desplazar hacia delante el cuerpo mandibular para compensar la retrusión fisiológica que la mandíbula tiene al nacer los bebés (Rakosi & Jonas, 1992) (Rondón, Zambrano, Guerra, & Rodríguez de Galarraga, 2018; 8,1). Los biberones no compensan esta ventaja porque existen grandes diferencias entre el pezón materno y los chupones de goma. Una de ellas está en el tamaño de los orificios de los chupones, resultan ser demasiado grandes para permitir el flujo constante del líquido, de tal forma que el sobreesfuerzo que el bebé debe hacer con su musculatura, no lo realiza. Sin embargo, el bebé se enfrenta al problema de ahogarse, y para evitarlo se obliga a deglutir la leche sin permitir el contacto de ésta con la saliva, evitándose así el proceso de predigestión. El seno materno por otra parte permite al niño controlar la salida de la leche, lo que no ocurre con el biberón. Los niños enfrentan esta situación arrojando el exceso de líquido fuera de la boca o regulan el fluido de líquidos mediante la lengua. La regulación mediante la lengua es la forma más simple de solucionar esa situación, porque la reacción normal es parar el chorro de leche con la punta de la lengua, con lo que se marca el inicio de un patrón de deglución atípica que repercute en el desequilibrio muscular de las estructuras orofaciales. (Campos,

2020).

El pezón materno es retráctil y elástico, fácilmente amoldable al surco de la lengua del bebé, lo que hace posible que sea presionado contra el paladar y alargado hacia atrás, hasta la unión del paladar duro con el blando, para completar el ordeñado del seno. El biberón no posee estas cualidades porque los materiales de su fabricación no tienen tales cualidades elásticas. Actualmente se trata de compensar esta limitación con la presentación de varios tamaños, texturas y formas de orificios. (Vaillard Jiménez, 1999)

Por otro lado, el uso prolongado del biberón evita la maduración de la deglución y permanece bajo un patrón visceral o inmaduro que tiene las características de los reflejos no condicionados al momento del nacimiento, donde lengua y labios integran una unidad funcional. como un



dilla equilibradora de la dinámica bucal. (Caguit, 1983). Durante la deglución visceral los maxilares permanecen separados y la lengua en posición adelantada y colocada entre las apófisis alveolares y con la punta fuera. La posición mandibular se estabiliza debido a la contracción de la musculatura orofacial y por el contacto de la lengua con los labios (Chaconas, 1982). El proceso deglutivo se realiza a través de la interacción sensorial entre labios y lengua, de esta forma puede iniciarse el peristaltismo lingual en el vestíbulo bucal (González Pérez, Santos Prieto, & Véliz Concepción, 2019; 23(1)) (véase la figura 1).



tiene la elasticidad que el pezón que le permite adaptarse a las estructuras intraorales y desarrollar la praxia de succión y deglución, y exige generar mayor presión con la lengua sobre el material del chupón. Si el niño continúa alimentándose con papillas o con biberón, se transformará en un masticador con abuso del músculo temporal; esto es, que efectuará movimientos de incisión en lugar de masticar con los maseteros, con lo que el acto masticatorio se transforma en movimientos extensos de molido.) (Vélez Sánchez & Terreros de Huc, 2021, 4, 4) (véase la figura 2).

La sobrecarga funcional masticatoria de los temporales es desfavorable porque altera el desarrollo de las estructuras óseas, siendo así, la consistencia de la alimentación es importante en el desarrollo de los maxilares. Debe existir armonía entre las funciones de los músculos masticadores. Si los maseteros tienen mayor actividad, existe sobrecarga funcional que propicia bases óseas grandes,



Resulta necesario analizar la deglución como parte del fenómeno de la maduración orofacial, como un reflejo condicionado que se modifica durante el desarrollo del aparato estomatognático.

Se reconoce un patrón de deglución infantil o visceral que Rix describió, que después debe adaptarse a las nuevas relaciones anatómicas, funcionales y dimensionales de la cavidad bucal. Por lo que se le conoce como deglución

Jiménez Tigreros, 2020 3.1) (véase la figura 4)

En conclusión, se puede establecer que la lactancia materna es la forma natural que estimula el crecimiento y desarrollo armónico de las estructuras faciales.



(véase figura 3).

Figura 4. Caries incipientes por uso constante del biberón y empuje lingual sobre los incisivos

Estudios posteriores demuestran la asociación entre la alimentación con biberón con maloclusiones por efecto de hábitos deformantes y pérdida prematura de órganos dentales por caries (Abreu, Paiva, & Pordeus, 2016;30,1:). (Lleón Barco &

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Agradecimientos

Agradecemos a la BUAP y al Complejo Regional Nororiental por promover e incentivar la investigación y divulgación de la ciencia en estudiantes del Centro Universitario de la Salud.

Referencias

- Abreu, L. G., Paiva, S. M., & Pordeus, L. A. (2016;30,1:). Breastfeeding bottle feeding and risk of malocclusion in mixed and permanent dentitions: a systematic review. *Brazilian Oral Research*, e:22.
- Arrobo, M., Montesdeoca, K. L., & Pérez, M. P. (2024). Prevalencia de hábitos deformantes y anomalías dentarias de posición. *Revista UG*, <https://revistas.ug.edu.ec/index.php/eoug/article/download/12/14?inline=1>.
- Barnett, E. M. (1978). *Terapia oclusal en Odontopediatría*. Buenos Aires: Panamericana.
- Campos, R. (2020). Deglución atípica: Una revisión. *Saluta*, 24-33.
- Canut, B. J. (1983). *Ortodoncia Clínica*. México D.F: Salvat .
- Chaconas, S. J. (1982). *Ortodoncia*. México D.F.: Manual Moderno.
- González Campoverde, L., Rodríguez Soto, A., & Soto Cantero, L. (2020,2,4). Factores de riesgo de la maloclusión. *Medicentro Electrónica*, http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1029-30432020000400753&script=sci_arttext&lng=en.
- González Pérez, Y., Santos Prieto, d., & Véliz Concepción, O. (2019; 23(1)). Patrón normal de maduración de la deglución. *Medicen Electrón*, https://www.researchgate.net/publication/331441308_Normal_pattern_of_mature_swallowing#fullTextFileContent.
- Houston, W. J., & Tulley, W. J. (1990). *Manual de Ortodoncia*. México D.F.: Médico Moderno.
- Lleón Barco, K., & Jiménez Tigreros, Z. (2020 3.1). Prevalencia de hábitos nocivos en pacientes con lactancia materna y biberón. *Revista Científica Especialidades Odontológicas UG.*, https://www.researchgate.net/publication/353253341_Prevalencia_de_habitos_nocivos_en_pacientes_con_lactancia_materna_y_de_biberon.
- Rakosi, T., & Jonas, J. (1992). *Atlas de Ortopedia Maxilar. Diagnóstico*. Barcelona: Científico y Técnicos. S.A.

Rondón, R., Zambrano, G., Guerra, M., & Rodríguez de Galarraga. (2018; 8,1). Relación entre un período de lactancia materna exclusiva menor de 6 meses y presencia de hábitos parafuncionales en un grupo de niños y adolescentes venezolanos. *Revista de Odontopediatría Latinoamericana*, 16-28.

Segovia, M. L. (1979). Interrelaciones entre la odontoestomatología y la fonoaudiología. La deglución atípica. Buenos Aires: Panamericana.

Vaillard Jiménez, E. (1999). El biberón y sus efectos. Puebla: Facultad de Estomatología.

Vélez Sánchez, C., & Terreros de Huc, M. (2021, 4, 4). Dsfunción lingual y su impacto en el desarrollo del complejo dentomaxilofacial. Revisión sistemática. *Revista Científica Especialidades Osontológicas UG*, <https://portal.amelica.org/ameli/journal/611/6112599006/6112599006.pdf>.