

ENFOQUES

TRANSDISCIPLINARIOS: CIENCIA Y SOCIEDAD



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación







ENFOQUES TRANSDISCIPLINARIOS: CIENCIA Y SOCIEDAD, volumen 3, no. 1, enero – junio 2025, es una publicación digital semestral editada y difundida por el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A. C. Av. Normalistas 800, Colinas de La Normal, C. P. 44270, Guadalajara, Jal., Tel. (33)3345-5200 ext. 1418 y 2007. <https://www.revistaenfoques.mx/>, revistaenfoques@ciatej.mx. Editores responsables: Dr. Luis Alfonso Mojica Contreras y Dr. Gustavo Adolfo Castillo Herrera. Reserva de derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-053011485500-102, ISSN 3061-709X, ambos otorgados por Instituto Nacional del Derecho de Autor. **Responsable de la última actualización de este número:** Departamento de Producción y cuidado editorial, Lic. José Enrique Rentería Méndez, Av. Normalistas 800, Colinas de La Normal, C. P. 44270, Guadalajara, Jal., fecha de última modificación, 18 de enero de 2025.



DIRECTORIO

DIRECTORA GENERAL DE LA REVISTA

Dra. Lorena Amaya Delgado
lamaya@ciatej.mx

EDITORES EN JEFE

Dr. Luis Alfonso Mojica Contreras
lmojica@ciatej.mx

Dr. Gustavo Adolfo Castillo Herrera
gcastillo@ciatej.mx

EDITORAS

Dra. Anne Christine Gschaedler Mathis
agschaedler@ciatej.mx

Dra. Eugenia del Carmen Lugo Cervantes
elugo@ciatej.mx

EDITORES(AS) ASOCIADOS(AS) INTERNOS(AS)

Tecnología Alimentaria

Dra. Judith Esmeralda Urias Silvas
urias@ciatej.mx

Dra. Elba Montserrat Alcázar Valle
ealcazar@ciatej.mx

Tecnología Ambiental

MC. Leonel Hernández Mena
lhernandez@ciatej.mx

Biotecnología Industrial

Dra. Rosa María Camacho Ruíz
rcamacho@ciatej.mx

Biotecnología Vegetal

Dra. Soledad García Morales
smorales@ciatej.mx

Dr. Yair Romero Romero
yromero@ciatej.mx

Biotecnología Médica y Farmacéutica

Dra. Alba Adriana Vallejo
avallejo@ciatej.mx

Unidad De Servicios Analíticos y Metrológicos (Usam)

M. en C. José de Jesús Díaz Torres
jdiaz@ciatej.mx

Subsede Sureste

Dra. Teresa del Rosario Ayora Talavera
tayora@ciatej.mx

Subsede Noreste

Dr. Kelvin Saldaña Villanueva
ksaldana@ciatej.mx

EDITORES(AS) ASOCIADOS(AS) EXTERNOS(AS)

Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca - Instituto de Investigaciones Sociológicas (IISUABJO)

Dra. Virginia Guadalupe Reyes de la Cruz
vgreyes@iisuabjo.edu.mx

Dr. Manuel Garza Zepeda
mgarza.cat@uabjo.mx

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH)

Dr. Gilber Vela Gutiérrez
gilber.vela@unicach.mx

Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS)

Dra. María Guadalupe Ramírez Rojas
guadalupe.ramirez@cieras.edu.mx

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD)

Dra. Doris Arianna Leyva Trinidad
doris.leyva@ciad.mx

Universidad de Guadalajara (UDG)

Dr. Efrén Orozco López
lopez_efren@hotmail.com

Dr. David Sánchez Sánchez
mpsdavids@gmail.com

Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro)

Dr. Martín Fierro Leyva
martinfierroleyva@yahoo.com.mx

Dra. Teolincacihuatl Romero Rosales
18029@uagro.mx

Tecnológico de Monterrey (Puebla)

Dr. Diego Armando Luna Vital
dieluna@tec.mx

Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C. (GEO)

Dra. Loecelia Ruvalcaba Sánchez
lruvalcaba@centrogeo.edu.mx

Colegio de Postgraduados (COLPOS)

Dr. Arturo Pérez Vázquez
parturo@colpos.mx

DISEÑO EDITORIAL

Producción y cuidado editorial

Lic. José Enrique Rentería Méndez

Lic. Jesús Fuentes González

Ilustración de portada y maquetación

Lic. Nayeli Citlalli Vallarta Díaz

Lic. José Enrique Rentería Méndez

CONTENIDO

9 Carta editorial



Desarrollo y procesos científicos y tecnológicos

- 15 **Organismos halófilos: extremos y amantes de la sal**
Mónica Lizeth Ibarra Moreno, Raúl Balam Martínez Pérez, María Isabel Estrada Alvarado y Rosa María Camacho Ruíz
- 29 **Consideraciones estadísticas en los ensayos de investigación preclínica**
Sarah Eliuth Ochoa Hugo, Genaro David Santillán Dávila y Rodolfo Hernández Gutiérrez
- 49 **Formulación de una bebida de jamaica con potencial hipoglucemiante a partir de proteína hidrolizada de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)**
Eduardo López-Ornelas, Jonhatan Contreras-Negrete, Luis Mojica y Montserrat Alcázar-Valle



Alimentación, salud y medioambiente

- 65 **En búsqueda de una dieta saludable: los patrones de alimentación y su impacto en la población**
Elda Cristina Villaseñor-Tapia, Edgar Rubén Mendieta-Condado y Ana Laura Márquez-Aguirre
- 83 **La salinización del suelo cultivable: causas, problemática actual asociada al cambio climático y áreas de oportunidad**
Patricia Paulina Hernández Victoria, Héctor Flores Magdaleno, Abel Quevedo Nolasco, Jorge Flores Velázquez, Gustavo Cruz Cárdenas y Nora Meráz Maldonado
- 103 **Plataformas empleadas en el desarrollo de biosensores y nanobiosensores para la detección de patógenos transmitidos por alimentos y agua**
América Selene Gaona Mendoza, Julio Armando Massange Sánchez y Luz Edith Casados Vázquez
- 119 **Inmunoterapias y virus oncolíticos: perspectiva en cáncer de próstata**
Mariana Bereth Minor-Pérez y Sara Elisa Herrera-Rodríguez
- 133 **Conocimientos y prácticas tradicionales en la gastronomía de los hongos silvestres de mujeres cocineras de San Antonio Cuajimoloyas, Oaxaca**
Israel Marruffo Betancourt, Iván Israel Juárez López y Alary Pereyra Martínez



Sociedad y sistemas agroalimentarios

- 157 **Hacia el concepto de afectaciones neuropsicosociales por la agroindustria en las niñas rurales**
David Sánchez Sánchez y Mariana Vianey Quiroz Romero
- 179 **Análisis del perfil proximal y proteico de una especie de frijol subutilizada de México: *Phaseolus coccineus* L.**
Eduardo Pizano-Galvez, Montserrat Alcázar-Valle, Jorge Luís Coronado-Cáceres, Luis Mojica y Eugenia Lugo-Cervantes
- 191 **Rendimiento productivo de un sistema acuapónico: análisis comparativo entre modalidad escalonada y por lotes**
Jesús Josafat De León-Ramírez, Juan Fernando García-Trejo, Carlos Francisco Sosa-Ferreya, Leticia Félix-Cuencas y Samuel López-Tejeida
- 205 **Una aproximación a la cadena de valor del pulpo maya**
María Laura García-Pérez, Luis Alberto Olvera-Vargas, Horacio Bautista-Santos, Loecelia Ruvalcaba-Sánchez y Yair Romero-Romero
- 221 **Geotecnologías para la caracterización de la caña de azúcar en el área de abastecimiento del Ingenio Tala, Jalisco**
Luis Alberto Olvera-Vargas, Noé Aguilar-Rivera y Yair Romero-Romero
- 235 **La importancia del maguey pulquero (*Agave salmiana*) en la alimentación y soberanía alimentaria**
Claudia Lizet Higuera-Orbe, Sergio Erick García-Barrón y Lorena Moreno-Vilet



Voces y diálogos divergentes

- 249 **La descentralización en la producción del conocimiento biotecnológico en el sector farmacéutico: el papel de los actores locales**
Talia Rebeca Haro Barón



CARTA EDITORIAL

Sean bienvenidas y bienvenidos a **Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad**, la revista digital del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad se plantea como un instrumento de análisis y discusión inter y transdisciplinario sobre los sistemas agroalimentarios, salud, medio ambiente, tecnología y ciencias sociales.

En esta edición, continuamos consolidando nuestro compromiso con el análisis crítico y la reflexión interdisciplinaria, incluyendo investigaciones que abordan retos globales desde diversas perspectivas. Cada una de nuestras secciones refleja el dinamismo y la relevancia de los temas que atraviesan la intersección entre ciencia, tecnología y sociedad.

Por ejemplo, en la sección **Desarrollo y procesos científicos y tecnológicos** los artículos considerados destacan el papel de la ciencia básica y aplicada en el avance del conocimiento. Desde la rigurosidad estadística en los ensayos preclínicos, hasta el desarrollo de bebidas innovadoras con propiedades hipoglucemiantes basadas en proteínas hidrolizadas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), y el fascinante mundo de los microorganismos halófilos, esta sección invita a reflexionar sobre cómo las innovaciones tecnológicas impactan directamente en la salud, la industria y el medio ambiente.

En la sección **Alimentación, salud y medioambiente**, las contribuciones profundizan en problemáticas contemporáneas y sus soluciones sostenibles. Desde los desafíos asociados a la salinización del suelo y el cambio climático, hasta el desarrollo de biosensores para garantizar la seguridad alimentaria, los artículos presentados en esta sección también exploran la importancia de patrones dietéticos saludables y nuevas perspectivas en inmunoterapias para el cáncer de próstata. Asimismo, se destaca el valor de los conocimientos tradicionales, como los saberes de mujeres cocineras en Oaxaca sobre hongos silvestres, subrayando la necesidad de preservar y valorar estas prácticas ancestrales.

La sección Sociedad y sistemas agroalimentarios aborda la complejidad de los sistemas productivos y su relación con la sostenibilidad. Desde el análisis de sistemas acuapónicos y cadenas de valor como la del pulpo maya, hasta estudios sobre la gestión territorial de cultivos clave como la caña de azúcar y el maguey pulquero, estos trabajos destacan el equilibrio entre productividad y conservación. Complementando estos temas, investigaciones sobre el frijol subutilizado (*Phaseolus coccineus* L.) y las afectaciones neuropsicosociales en niñas rurales subrayan la importancia de un enfoque holístico para comprender los impactos de la agroindustria.

Finalmente, en nuestra sección Voces y diálogos divergentes, se presenta una reflexión sobre la descentralización en la producción de conocimiento y el papel crucial de los actores locales. Este artículo nos invita a reconsiderar las estructuras de poder en la generación y distribución de saberes, proponiendo una ciencia más inclusiva y accesible.

En conjunto, este número pone de manifiesto cómo las ciencias y los conocimientos tradicionales pueden dialogar para enfrentar los desafíos actuales. Desde la salud y la seguridad alimentaria hasta la gestión sostenible de recursos, las investigaciones aquí presentadas subrayan la importancia de soluciones integrales, interdisciplinarias y transdisciplinarias para un futuro equitativo y sostenible.

Agradecemos profundamente a nuestros autores, revisores y lectores por hacer posible esta publicación. Les invitamos a sumergirse en estas páginas y a compartir sus reflexiones con nuestra comunidad.

Dr. Luis Alfonso Mojica Contreras

Dr. Gustavo Adolfo Castillo Herrera

Editores en Jefe, Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad

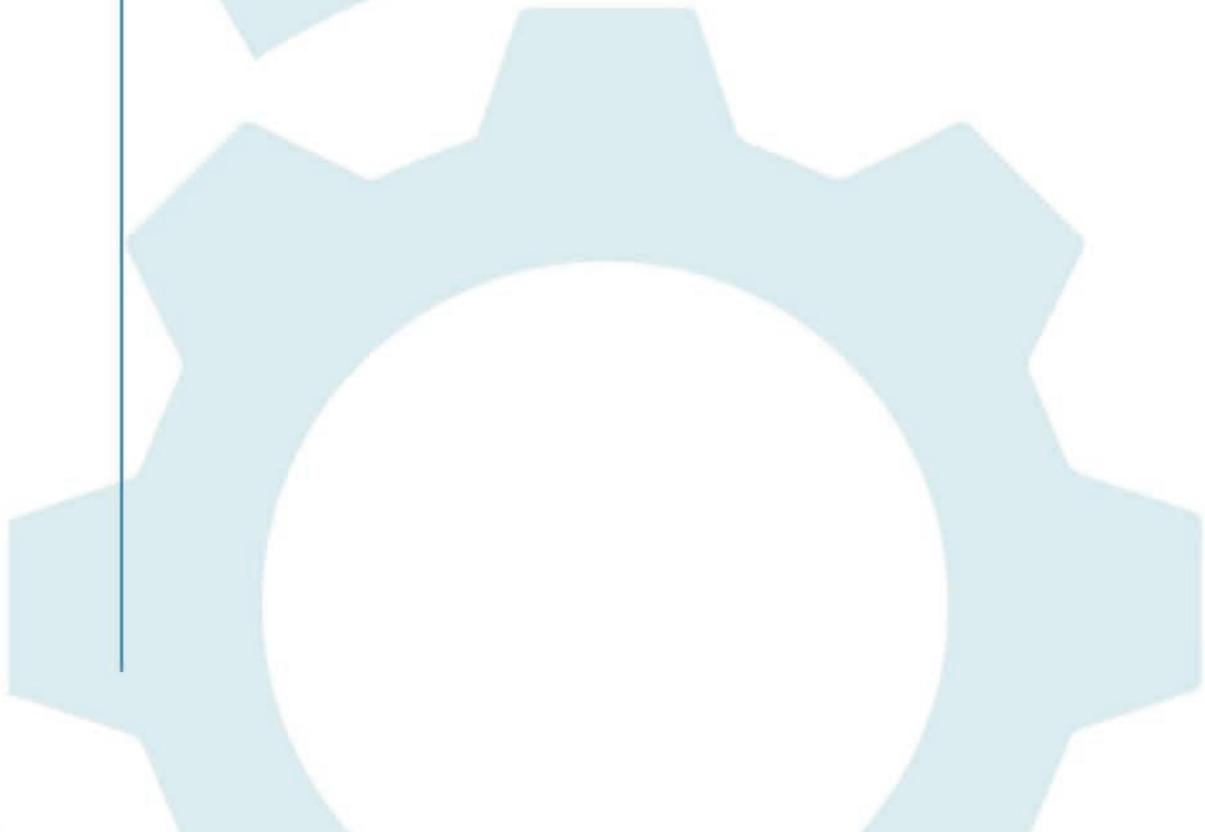






DESARROLLO Y PROCESOS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS





Organismos halófilos: extremos y amantes de la sal

Mónica Lizeth Ibarra Moreno¹, Raúl Balam Martínez Pérez^{1*}, María Isabel Estrada Alvarado¹ y Rosa María Camacho Ruíz²

¹Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias, Instituto Tecnológico de Sonora, C. 5 de febrero 818, Centro, Urb. No. 1, 85000 Cdad. Obregón, Son.

²Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Cam. Arenero 1227, El Bajío, 45019 Zapopan, Jal.

*Autor de correspondencia: raul.martinez@itson.edu.mx

Palabras clave:

biotecnología, extremófilos, halófilos, microorganismos.

Resumen

Los halófilos son organismos que destacan entre otros micro y macroorganismos por su capacidad de prosperar en ambientes hipersalinos. Los microorganismos halófilos poseen adaptaciones metabólicas que les permite equilibrar las concentraciones de distintas sales en el interior de la célula. Estos microorganismos son foco de interés para diversos sectores industriales debido a que pueden producir biopolímeros y catalizadores biológicos de interés industrial; además han demostrado gran potencial en procesos de biorremediación, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. El estudio de los microorganismos halófilos o algunas de sus partes (proteínas, carbohidratos o lípidos) nos ha permitido comprender cada vez más sobre su biología y sus potenciales usos biotecnológicos. Es por eso que el objetivo de la presente revisión nos adentra al mundo de este fascinante tipo de microorganismos y su empleo en la industria y medio ambiente.

Introducción

Los microorganismos tienen distintos tamaños, en el filo Eucaria su tamaño es mayor a 100 μm , en comparación con los otros 2 filos Arquea y Bacteria que miden entre 1-5 μm (Audesirk et al., 2003). Solo se observan utilizando microscopio; sin embargo, aún con ese tamaño pueden presentar variedad de formas (ej. cocos, bacilos o espirilos, entre otros) (Vargas, 2014). Los microorganismos los podemos encontrar dentro de los 3 filos como lo son Bacteria (por ejemplo, *Campylobacter*, *Clostridium perfringens* y *E. coli*), Arquea (por ejemplo, *Diapherotrites*, *Micrarchaeota* y *Aenigmarchaeota*) y Eukaria (protozoos, algas, hongos, plantas y animales). Las bacterias y las arqueas tienen

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 15-28.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14705957>

Recibido: 10 septiembre 2024
Revisado: 11 de noviembre 2024
Aceptado: 30 de noviembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



un parecido en cuanto a su estructura, pero presentan las siguientes características que las diferencian (Tabla1).

Tabla 1. Diferencia entre arqueas y bacterias

Bacteria	Arquea	Referencias
Su pared celular está compuesta principalmente de peptidoglicano.	Su pared celular no contiene peptidoglicano, sino una variedad de componentes.	(Prats, 2008; Villalobos, 2001)
Su membrana celular está compuesta de lípidos con enlaces éster.	Su membrana celular está compuesta de lípidos con enlaces éter, lo que les proporciona mayor estabilidad en ambientes extremos.	(Prats, 2008; Villalobos, 2001)
Más sensible a los antibióticos	Resistencia a la mayoría de antibióticos.	(Bédis et al., 2011; Cardona C., 2006)

Fuente: Tabla realizada de acuerdo a la diferencia de composición entre arqueas y bacterias con respecto a las referencias

Las bacterias y arqueas que crecen en ambientes con altas concentraciones de sales como el calcio, el cloruro de sodio y/o el magnesio son conocidas como halófilas (Ramírez, 2020) y se clasifican según su capacidad de subsistir a diferentes concentraciones de sal. Algunos de estos microorganismos (ej. *Halobacterium halobium*) son fotótrofos, es decir, obtienen energía a partir de la radiación producida por el sol, y tienen la capacidad de producir proteínas como la bacteriorodopsina y rodopsina que regulan la respuesta fototáctica (Ramírez, 2006). Esas características de los microorganismos halófilos son indudablemente fascinantes desde el punto de vista tecnológico y biológico.

En la presente revisión damos una mirada de forma general a los halófilos, los cuales empiezan a tomar gran relevancia en múltiples usos en la industria biotecnológica gracias a su capacidad de producción de enzimas, polímeros, elaboración de alimentos fermentados, así como su potencial uso en la biodegradación de residuos y biorremediación de suelos con alta salinidad, entre otros aspectos biotecnológicos.

Desarrollo

¿Qué son los microorganismos halófilos?

Los halófilos, según su etimología griega, son denominados amantes de la sal, habitan en ambientes que tienen una concentración de sal superior a la que se encuentra en el agua de mar, a esos ambientes se les conoce como hipersalinos. Incluyen principalmente microorganismos procariotas y eucariotas con capacidad para equilibrar la presión osmótica del medio y resistir los efectos desnaturalizantes de las sales; son capaces de subsistir en presencia de sal (5 a 30% NaCl) y radiación UV (que van de 0.3-8 W/cm) (Asgarani, 1983). Clasificados como halófilos podemos encontrar algunas plantas, crustáceos, bacterias, hongos y mayoritariamente arqueas (Costa et al., 2019), además de microalgas fotosintéticas (DasSarma & DasSarma, 2017).



Estos organismos se clasifican de acuerdo a la concentración de sal del ambiente donde ellos se encuentran (principalmente cloruro de sodio). Kushner en el año 1978 afirmó que la característica común de muchos organismos marinos es su capacidad de vivir en ambientes con baja salinidad, lo que los define como halófilos débiles. Es importante conocer que el agua de mar contiene cerca del 3% en relación a m/v de NaCl, entonces la concentración de NaCl óptima para el crecimiento de halófilos moderados se sitúa entre 3 y 15% (m/v), mientras que los halófilos extremos requieren al menos 25% (m/v) de NaCl (Kushner, 1978).

¿Dónde pueden encontrarse?

A diferencia de la mayoría de los organismos, los halófilos pueden prosperar en un rango de salinidad mucho más amplio que el del agua de mar (3 - 5% m/v de NaCl), llegando a tolerar concentraciones hasta siete veces mayores, como las encontradas en el Mar Muerto (35% a 37% m/v de NaCl) (Camacho, 2019; Oliart et al., 2016).

Estos microorganismos han sido estudiados en lagos salinos o salinas marinas, como ejemplo el Gran Lago Salado en Utah Estados Unidos o el Salar de Atacama en Chile con 22% y 15 - 30% de salinidad, respectivamente (Ramírez, 2004). En Alicante, España, también se han podido estudiar estos microorganismos, y se han encontrado en suelos que contienen desde 2.4 a 12.7% de sal; en el Mar Muerto con 25 a 30% de sal (Ramírez, 2004). En costras de sal (Figura 1), donde típicamente se pueden encontrar coloraciones rosadas, dicha coloración corresponde a colonias de microorganismos que producen pigmentos carotenoides, que protegen a las células de la radiación ultravioleta y les permiten captar energía lumínica.

Los halófilos han encontrado su nicho ecológico en diversos ambientes, fríos o cálidos. Se han encontrado en los gélidos lagos antárticos con 28% de salinidad y en climas cálidos y alcalinos, tal como el Lago Specchio di Venere en Italia, con una salinidad que oscila entre el 9 y el 17%; incluso en entornos tan inesperados como los alimentos, como la salsa de soya (6.5-10% de salinidad) y el bacalao salado (19%). Los ejemplos anteriores son un ejemplo de que los halófilos pueden prosperar en ambientes poco favorables, demostrando su versatilidad y resistencia a condiciones extremas (Ramírez, 2004).



Figura 1. Halófilos creciendo sobre sal. Muestra de suelo recolectada de la salinera "Santa Barbara" ubicada en Yavaros, Sonora, México, donde la coloración rosada en la parte inferior nos indica la presencia de microorganismos halófilos creciendo sobre la sal; la coloración verde indica presencia de microalgas.

Fuente: propia

Alrededor del mundo encontramos a los halófilos distribuidos geográficamente en lugares con altas concentraciones de sal, ya sean zonas áridas o costeras y a diferentes profundidades marinas, etc. (DasSarma, 2001). Por ejemplo, *Virgibacillus salarius* y *V. marismortui* han sido aislados en la India y en el Mar Muerto, respectivamente (Arahal et al., 1999; Hua et al., 2008). La arquea *Halorubrum distributu* se ha encontrado en suelos salinos de África (Kamekura & Dyll-Smith, 1995), mientras que *H. chaviator* ha sido aislada en Grecia, Australia, Naxos y Baja California (Mancinelli et al., 2009). Es importante destacar que, a excepción de *H. chaviator*, estas especies no han sido reportadas en México. Los microorganismos halófilos que se han reportado en México han tenido fines industriales o de estudio. En estos trabajos cuyas ubicaciones de aislamiento han sido de algunos estados de México (Figura 2), se reportan géneros como *Salinococcus*, *Halomonas*, *Nocardiopsis*, *Halococcus*, *Haloquadratum* y también arqueas de los géneros *Haloarcula*, *Halobacterium*, *Methanosarcina* (Coronado et al., 2018; Castro et al., 2011; Rosas, 2017; Castro et al., 2011; Tamez, 2009).



Figura 2. Ubicaciones de microorganismos halófilos reportados en México. Los colores nos indican los diferentes estados donde se reportaron microorganismos halófilos con fines industriales o de estudio (Coronado et al., 2018; Castro et al., 2011; Rosas, 2017; Castro et al., 2011; Tamez, 2009).

Fuente: propia

¿Cómo pueden vivir en altas concentraciones de sal y al estrés producido por las otras condiciones ambientales?

Los microorganismos halófilos producen pigmentos rojos e incluso morados para absorber la luz solar, como se puede apreciar en la Figura 3 la coloración rosada, donde se muestran cepas aisladas de bacterias halófilas, presentando distintas tonalidades rosadas en incluso algunas anaranjadas. Los halófilos pueden realizar la fotosíntesis, además de la gran capacidad de osmorregulación que poseen, lo cual impide que se descompensen por los cambios salinos (Oren, 1999).

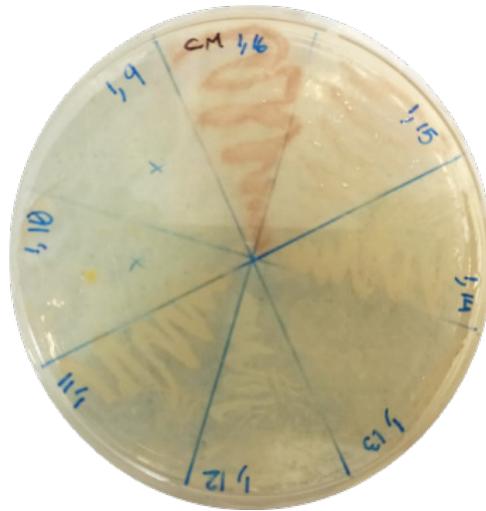


Figura 3. Cepas de bacterias halófilas aisladas en la salinera de la Bahía de Santa Barbara, Sonora, México. Caja Petri con agar marino donde se aislaron distintas cepas bacterianas halófilas. Estas producen distintas coloraciones, donde el color varía de rosa, naranja y rojizo, además de que el tamaño y la forma es diferente. Con esto se aprecia que dependiendo de la especie varía el pigmento producido.
Fuente: propia

Los microorganismos halófilos han desarrollado una serie de mecanismos para adaptarse a condiciones ambientales desafiantes. Uno de los principales retos que enfrentan estos microorganismos es la osmorregulación, es decir, la capacidad de mantener un equilibrio osmótico interno a pesar de los cambios en la concentración de solutos en el medio externo (Kim, 2013); dos de las estrategias más comunes de osmoadaptación es el “Mecanismo de sal en el citoplasma (mejor conocido en inglés como Salt-in-Cytoplasm Mechanism) y el Mecanismo Orgánico-Osmolítico (mejor conocido en inglés como Organic-Osmolyte Mechanism).

El mecanismo de "sal en el citoplasma" es característico de las arqueas halófilas, consiste en la acumulación de altas concentraciones de sales inorgánicas, principalmente cloruro de potasio (KCl), dentro de la célula, esto permite equilibrar la presión osmótica interna con la externa, evitando la pérdida de agua. Sin embargo, esta adaptación requiere de una serie de ajustes a nivel molecular, como la presencia de proteínas con un alto contenido de aminoácidos ácidos que estabilizan la estructura proteica en ambientes de alta fuerza iónica (Figura 4). A pesar de su eficacia, esta estrategia limita el rango de adaptación de los organismos, ya que la alta concentración de sales en el citoplasma puede desestabilizar las estructuras celulares en condiciones de baja salinidad (Kunte, 2009).

Por otro lado, el mecanismo orgánico-osmolítico, empleado por una amplia variedad de microorganismos, implica la acumulación de compuestos orgánicos, como azúcares, polioles y aminoácidos, los cuales son denominados solutos compatibles. Estos compuestos no solo equilibran la presión osmótica, sino que también actúan como protectores celulares, estabilizando proteínas y membranas (Kunte, 2009).

La concentración intracelular de iones o compuestos orgánicos compatibles confiere a las células una notable capacidad adaptativa a condiciones de alta salinidad, de tal manera que esta sea una respuesta al estrés salino. Para evitar este tipo de estrés, se involucran mecanismos moleculares complejos y rápidos, entre los que destaca la creación de proteínas, síntesis de compuestos intracelulares y las modificaciones postraduccionales que a estas se les confieren para llevar a cabo la protección celular (González, 2002).

La membrana celular actúa como una barrera selectiva que protege contenido intracelular, cuando la célula se enfrenta a cambios en la concentración de sal, su membrana se puede adaptar modificando su composición lipídica. Este proceso implica un aumento en la proporción de fosfolípidos con carga negativa como el fosfatidilglicerol y la cardiolipina, y una disminución en la proporción de fosfatidiletanolamina, un fosfolípido neutro. Esto es fundamental para mantener la estructura de la membrana en forma de bicapa lipídica, ya que la fosfatidiletanolamina tiene una tendencia a formar estructuras monocapa en condiciones de alta salinidad (Vreeland & Hochstein, 2020).

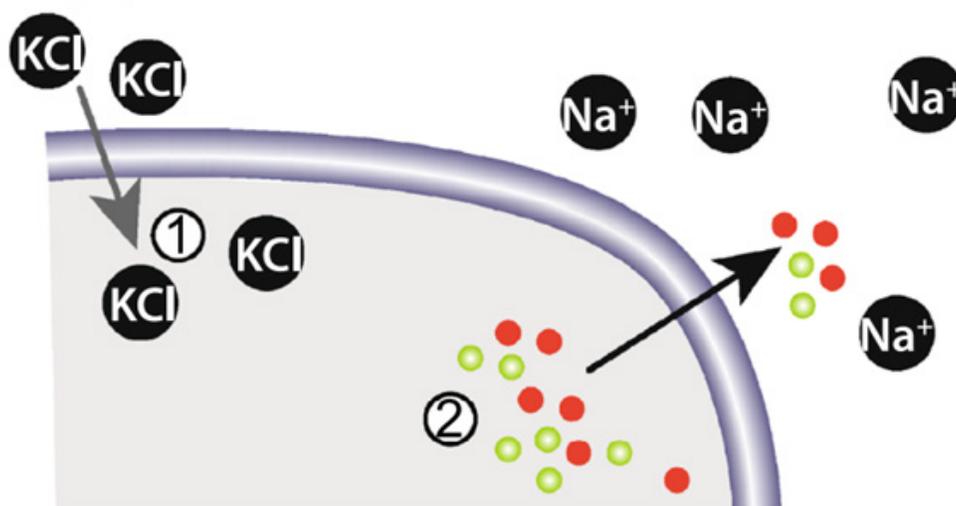


Figura 4. Mecanismo sal en el citoplasma (Salt-In-Cytoplasm Mechanism). Los osmoprotectores retienen la presión osmótica dentro de la célula a través de (1) la estrategia de sal en el citoplasma o (2) la síntesis o acumulación de osmoprotectores. La flecha 1 muestra la entrada de KCl hacia el interior de la célula, mientras que la flecha 2 indica la mayor concentración de Na⁺ en el exterior.

Fuente: Tomado de Sorokin, 2014.

Otro de las estrategias a destacar en estos microorganismos, es la producción de pigmentos, tales como como la bacteriorrodopsina y la halorrodopsina, los cuales permiten a las arqueas captar la luz solar y transformarla en energía, tal como si tuvieran pequeñas plantas de energía solar dentro de ellas. (Oren, 1999).



¿Qué tipo de aplicación tienen los microorganismos halófilos?

Los microorganismos halófilos son productores de una amplia gama de compuestos bioactivos de interés industrial, tales como enzimas y biopolímeros. Debido a sus características fisiológicas y su capacidad de desarrollarse en medios salinos altamente concentrados; lo convierte en sistemas microbianos atractivos para la producción de biomoléculas de alto valor añadido. La facilidad de cultivo y los bajos requerimientos nutricionales de estos microorganismos, los posicionan como una alternativa prometedora para diversas aplicaciones biotecnológicas (Ventosa, 1995).

Las enzimas que producen los halófilos son de gran interés en la industria, esto se debe a que en muchos procesos industriales se desarrollan en condiciones extremas de pH, temperatura, baja actividad de agua. Las haloenzimas (enzimas de organismos halófilos) pueden utilizarse para producir alimentos con mayor gama de sabores y otros productos de interés comercial (Kamekura, 1982).

Las haloenzimas más estudiadas han sido las hidrolasas extracelulares producidas por bacterias moderadamente halófilas (lipasas, proteasas y amilasas). Por ejemplo, la amilasa de *Halomonas meridiana* (Martínez-Pérez et al., 2020), así como las lipasas y proteasas del género *Nesterenkonia*, se han utilizado para llevar a cabo la hidrólisis de proteína de pescado y la producción de butil oleato (aditivo para combustibles).

Entre los solutos compatibles que producen los halófilos encontramos a las ectoínas, que destacan por su notable capacidad para proteger enzimas sensibles, como el lactato deshidrogenasa y la fructoquinasa, de diversos tipos de estrés, incluyendo el térmico y el criogénico. En estudios realizados nos mencionan que la ectoína y la hidroxiectoína han demostrado ser los solutos compatibles más eficaces para proteger enzimas sensibles, ya que se ha demostrado su superioridad en la protección contra el daño por calor, frío y otros factores de estrés (Aragón-León et al., 2023).

La dependencia de procesos biológicos para obtener ectoína e hidroxiectoína ha generado un gran interés industrial en las bacterias halófilas. El trabajo pionero de Frings et al. (1995) desarrolló un método para producir estos compuestos a partir de *Marinococcus*; marcó un punto de inflexión en este campo.

Los biopolímeros bacterianos, gracias a sus propiedades surfactantes y emulsionantes, son de gran interés para la industria petrolera, donde pueden mejorar la eficiencia de los procesos de extracción de crudo (Martínez, 2002). Se han aislado más de 200 cepas de bacterias halófilas moderadas, adaptadas a crecer en los exigentes ambientes de las bolsas subterráneas de crudo. Estas bacterias han demostrado la capacidad de producir biopolímeros surfactantes, altamente resistentes a las condiciones de alta salinidad. Un ejemplo de ello es *H. euribalina*, que produce un exopolisacárido cuando se cultiva a 32 °C de temperatura y una concentración del 7.5% de sales totales. El exopolisacárido producido por *H. euribalina* exhibe un



comportamiento pseudoplástico y una alta viscosidad a pH ácido, lo que, combinado con su termoestabilidad, lo convierte en un biopolímero con un amplio rango de aplicaciones potenciales, incluyendo la biorremediación y la industria petrolera (Quesada, 1993). Otro exopolisacárido reportado ha sido un fructano tipo inulina biosintetizado por la arquea *Haloarcula* sp., aislada de la salina de Santa Barbara en México (Vázquez, 2021), y la cual abre amplias posibilidades de que este tipo de carbohidrato sea utilizado en la industria de alimentos.

En la eliminación de residuos tóxicos, las bacterias halófilas moderadas son prometedoras, especialmente en aguas residuales hipersalinas que son generadas por industrias como la química y la petrolera. Estas bacterias, como *Halanaerobium praevalens* y *Orenia marismortui* pueden degradar compuestos aromáticos e hidrocarburos en condiciones de alta salinidad, ofreciendo una alternativa a tratamientos microbiológicos convencionales (Oren et al., 1991), que pueden degradar compuestos aromáticos nitrados en concentraciones de 13 a 14%.

Desde los primeros estudios de DeFrank y Cheng en 1991, las bacterias halófilas moderadas han demostrado tener un gran potencial biotecnológico. Sus aplicaciones incluyen el tratamiento de aguas residuales contaminadas con fenol (Woolard e Irvine, 1992) y la degradación de compuestos tóxicos como los cloroaromáticos (Maltseva et al., 1996), lo que las convierte en una posible gran herramienta para la biorremediación.

Una bacteria, inicialmente clasificada como *Alteromonas*, aislada de un manantial salino en Utah, ha abierto la puerta a la identificación de un grupo de seis cepas bacterianas capaces de degradar compuestos organofosforados. Esta capacidad de degradar sustancia altamente tóxica ha sido de gran interés; ya que la contaminación por metales pesados representa una amenaza ambiental significativa. Sin embargo, el descubrimiento de bacterias halófilas moderadas resistentes a metales como cadmio, cobre, cinc, cromo y mercurio ofrece una prometedora solución biotecnológica. Estas cepas podrían utilizarse tanto para descontaminar ambientes salinos como para evaluar el nivel de contaminación en estos ecosistemas.

De acuerdo a literatura, la producción de salsa de soya tradicional se beneficia de la presencia de bacterias halófilas moderadas, como las especies de *Tetragenococcus*. Estas bacterias, especialmente *T. halophila*, no solo son indicadores de una fermentación adecuada, sino que también pueden alcanzar altas densidades poblacionales en un ambiente tan salino como la salsa de soya madura (aproximadamente 3M NaCl), según los estudios de Röling (1996).

Las bacterias halófilas moderadas, adaptadas a vivir en ambientes de alta salinidad, presentan un gran potencial biotecnológico. Además de su uso tradicional en la producción de alimentos, estas bacterias pueden ser utilizadas para: (1) biorremediar am-



bientes contaminados con fosfatos, (2) tratar residuos industriales salinos provenientes de la industria del aceite de oliva y del curtido de pieles, (3) producir biosurfactantes con aplicaciones en la industria de detergentes y cosméticos, (4) generar enzimas de interés industrial y biomédico y (5) mejorar la tolerancia al estrés salino en cultivos agrícolas. Un ejemplo de esta última aplicación es la transferencia exitosa del gen de la ectoína —un osmolito compatible producido por *Halomonas elongata*— a plantas de tabaco, lo que ha resultado en plantas más tolerantes a la salinidad.

Conclusión

La investigación en organismos halófilos, principalmente en microorganismos, ha evidenciado el gran potencial que estos tienen en diversas industrias. Sin duda, estos organismos se van abriendo paso poco a poco para la generación de nuevas tecnologías alimentarias, farmacéuticas, cosmética, ambientales, entre otras, generando así también el impulso de procesos más sostenibles y eficientes

Sin embargo, aún queda mucho por explorar, por ejemplo, la formulación de nuevos medios de cultivo para su crecimiento y aislamiento, la secuenciación de genomas y transcriptomas, comprender mejor su diversidad genética y metabólica, así como la modificación genética de estos organismos y mejorar la producción de compuestos de interés industrial.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Referencias

- Aragón-León, A., Moreno-Vilet, L., González-Ávila, M., Mondragón-Cortez, P. M., Sasaki, G. L., Martínez-Pérez, R. B., & Camacho-Ruiz, R. M. (2023). Inulin from halophilic archaeon *Haloarcula*: Production, chemical characterization, biological, and technological properties. *Carbohydrate Polymers*, 321, 121333. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121333>
- Arahal, D. R., Marquez, M. C., Volcani, B. E., Schleifer, K. H., and Ventosa, A. (1999). *Bacillus marismortui* sp. nov., a new moderately halophilic species from Dead Sea. *International Journal Systematic Bacteriology*, 49(2), 521-530. <https://doi.org/10.1099/00207713-49-2-521>.
- Asgarani, E., Funamizu, H., Saito, T., Terato, H., Ohyama, Y., Yamamoto, O., & Ide, H. (1999). Mechanisms of DNA protection in *Halobacterium salinarium*, an extremely halophilic bacterium. *Microbiological Research*, 154(2), 185-190. [https://doi.org/10.1016/s0944-5013\(99\)80013-5](https://doi.org/10.1016/s0944-5013(99)80013-5)



- Audesirk, T., Audesirk, G. & Byers, B. E. (2003). *Biología: La vida en la Tierra con fisiología*. Pearson.
- Bédis Dridi, Marie-Laure Fardeau, Bernard Ollivier, Didier Raoult, Michel Drancourt, (2011). El patrón de resistencia a los antimicrobianos de los metanógenos humanos cultivados refleja la posición filogenética única de las arqueas. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 66(9), Páginas 2038–2044, <https://doi.org/10.1093/jac/dkr251>
- Camacho Ruíz, R. M. (2019). *Bacterias aisladas de Cuatro Ciénegas*. CIATEJ. <https://ciatej.mx/el-ciatej/comunicacion/Noticias/Bacterias-aisladas-de-Cuatro-Cienegas/100>
- Cardona, C. G. (2006). Microbiología clínica de Guillem Prats. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 24(3), 215. [https://doi.org/10.1016/s0213-005x\(06\)73762-4](https://doi.org/10.1016/s0213-005x(06)73762-4)
- Costa, M. I., Cerletti, M., Ferrari, M. C., Gimenez, M. I., Karina, H. S., Nercessian, D., Paggi, R. A., Pegoraro, C. N., Rabino, A., Redersdorff, I. E., Solchaga, J. I., Urquiza, D. N., & Esther, D. C. R. (2019). Halófilos en acción. En *Jornadas de Investigación de la Universidad Nacional de Mar del Plata* (p. 203). Universidad Nacional de Mar del Plata <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/174112>
- DasSarma, S., & P. (2001). *Halophiles. Enciclopedia of Life Sciences*. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0000394.pub3>
- DasSarma, S., & P. (2017). *Halophiles. Encyclopedia Of Life Sciences*. Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0000394.pub4>
- De Frank, J. J., & Cheng, T. C. (1991). Purification and properties of an organophosphorus acid anhydrase from a halophilic bacterial isolate. *Journal Bacteriology*, 173(6), 1938-1943. <https://doi.org/10.1128/jb.173.6.1938-1943.1991>
- Frings, E., Sauer, T., & Galinski, E.A. (1995). Production of hydroxyectoine: high cell-density cultivation and osmotic downshock of *Marinococcus* strain M52. *Journal of Biotechnology*, 43(1), 53-61. [https://doi.org/10.1016/0168-1656\(95\)00119-2](https://doi.org/10.1016/0168-1656(95)00119-2).
- González Hernández, J. C., & Peña, A. (2002). Estrategias de adaptación de adaptación de microorganismos halófilos y *Debaryomyces hansenii* (Levadura halófila). *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 44(3-4), 137-156. <https://www.mediagraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=4166>
- Hua, P., Hamza- Chaffai, A., Vreeland, R. H., Isoda, H., & Naganuma, T. (2008). *Virgibacillus salarius* sp. nov., a halophilic bacterium isolated from a Saharan salt lake. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58(10), 2409-2414. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.65693-0>.
- Kamekura, M., & Dyall-Smith, M. L. (1995). Taxonomy of the family Halobacteriaceae and the description of two new genera *Halorubrobacterium* and *Natrialba*.



- The Journal of General and Applied Microbiology*, 41(4), 333-350. <https://doi.org/10.2323/jgam.41.333>
- Kamekura, M., Hamakawa, T., & Onishi, H. (1982). Application of halophilic nuclease H of *Micrococcus varians* subsp. halophilus to commercial production of flavoring agent 5'-GMP. *Applied and environmental microbiology*, 44(4), 994–995. <https://doi.org/10.1128/aem.44.4.994-995.1982>
- Kim, J., Enache, E., & Hayman, M. (2013). 17. *Halophilic and Osmophilic Microorganisms*. American Public Health Association eBooks. <https://doi.org/10.2105/mbef.0222.022>
- Kunte, H. J. (2009). Osmoregulation in halophilic bacteria. Extremophiles. *Encyclopedia of Life Support Systems*, (2), 263-77.
- Kushner D.J. (1978). Life in high salt and solute concentrations. En *Microbial life in extreme environments* (pp. 317-368). Academic Press.
- Maltselva, O., Mc Gowan, C., Fulthorpe, R., & Oriel, P. (1996). Degradation of dichlorophenoxyacetic acid by haloalkaliphilic bacteria. *Microbiology*, 142(5), 1115-1122. <https://doi.org/10.1099/13500872-142-5-1115>
- Mancinelli, R. L., Landheim, R., Sanchez-Porro, C., Dornmayr-Pfaffenhuemer, M., Gruber, C., Legat, A., Ventosa, A., Radax, C., Ihara, K., White, M. R., & Stan-Lotter, H. Mancinelli, R. L., Landheim, R., Sánchez- Porro, C., Dornmayr-Pfaffenhuemer, M., Gruber, C., et al. (2009). Halorubrum chaoviator sp. nov., a haloarchaeon isolated from sea salt in Baja California, Mexico, Western Australia and Naxos, Greece. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 59(8), 1908-1913. <https://doi.org/10.1099/ij.s.0.000463-0>
- Martínez-Checa, F., Toledo, F.L., Vílchez, R., Quesada, E., & Calvo, C. (2002). Yield production, chemical composition, and functional properties of emulsifier H28 synthesized by *Halomonas eurialina* strain H-28 in media containing hydrocarbons. *Appl Microbiology Biotechnology*, 58, 358-363. <https://doi.org/10.1007/s00253-001-0903-6>
- Martínez-Pérez, R. B., Rodríguez, J. A., Cira-Chávez, L. A., Dendooven, L., Viniegra-González, G., & Estrada-Alvarado, I. (2020). Exoenzyme-producing halophilic bacteria from the former Lake Texcoco: identification and production of n-butyl oleate and bioactive peptides. *Folia Microbiologica*, 65(5), 835-847. <https://doi.org/10.1007/s12223-020-00794-5>
- Oliart-Ros, R. M., Manresa-Presas, Á., Sánchez-Otero, M. G., (2016). Utilización de microorganismos de ambientes extremos y sus productos en el desarrollo biotecnológico. *CienciaUAT*, 11(1), 79-90.
- Oren, A. (1999). Bioenergetic Aspects of Halophilism. *Microbiology And Molecular Biology Reviews*, 63(2), 334 - 348. <https://doi.org/10.1128/mnbr.63.2.334-348.1999>



- Oren, A., Guverich, P., & Henis, Y., (1991). Reduction of nitrosubstituted aromatic compounds by the halophilic anaerobic eubacteria *Haloanaerobium praevalens* and *Sporohalobacter marismousrtui*. *Appl Environ Microbiology*, 57(11), 3367-3370. <https://doi.org/10.1128/aem.57.11.3367-3370.1991>
- Pfiffner, S.M., Mc Inerney, M.J., Jenneman, G.E., & Knapp, R.M. (1986). Isolation of halotolerant, thermotolerant, facultative polymer-producing bacteria and characterization of the exopolymer. *Appl Environ Microbiology*, 51(6), 1224-1229. <https://doi.org/10.1128/aem.51.6.1224-1229>
- Prats, G. (2006). *Microbiología Clínica*. Ed. Médica Panamericana. 847903971X, 9788479039714.
- Quesada, E., Bejar, V. & Calvo, C. (1993). Exopolysaccharide production by *Volcaniella euribalina*. *Experientia*, 49, 1037–1041. <https://doi.org/10.1007/BF01929910>
- Ramírez D., N., Serrano R., J. A., & Sandoval T., H. (2006). Microorganismos extremófilos. Actinomicetos halófilos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 37(3), 56-71. <https://www.redalyc.org/pdf/579/57937307.pdf>
- Ramírez Regalado, V. M. (2020). *Introducción a la Bioquímica*. Grupo Editorial Patria.
- Ramírez, N, Sandoval, AH, & Serrano, JA. (2004). Las bacterias halófilas y sus aplicaciones biotecnológicas. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 24(1-2), 12-23. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562004000100004&lng=es&tlng=es
- Roling, W., & van Verseveld, H. W. (1996). Characterization of *Tetragenococcus halophilus* Populations in Indonesian Soy Mash (Kecap) Fermentation. *Applied and environmental microbiology*, 62(4), 1203–1207. <https://doi.org/10.1128/aem.62.4.1203-1207.1996>
- Sorokin, D. Y., Berben, T., Melton, E. D., Overmars, L., Vavourakis, C. D., & Muyzer, G. (2014). Microbial diversity and biogeochemical cycling in soda lakes. *Extremophiles : life under extreme conditions*, 18(5), 791–809. <https://doi.org/10.1007/s00792-014-0670-9>
- Vargas Flores, T., & Kuno Vargas, A. (2014). Morfología bacteriana. *Revista de Actualización Clínica Investiga*, 49, 2594. http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2304-37682014001000002&lng=es&nrm=iso.
- Vázquez, A. (2021). *Bioprospección de arqueas halófilas para la producción de pigmentos carotenoides: aislamiento, identificación y factores que afectan la producción* [tesis de maestría, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco]. Repositorio Institucional CIATEJ. <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/794/1/Ana%20Sof%C3%ADa%20V%C3%A1zquez%20Madrigal.pdf>



- Ventosa, A., & Nieto, J. J. (1995). Biotechnological applications and potentialities of halophilic microorganisms. *World Journal Of Microbiology And Biotechnology*, 11(1), 85-94. <https://doi.org/10.1007/bf00339138>
- Villalobos, Karla, & Herrera, Marco L.. (2001). Pruebas de sensibilidad a los antibióticos; su utilidad según agente infeccioso. *Revista Médica del Hospital Nacional de Niños Dr. Carlos Sáenz Herrera*, 36(1-2), 69-76. Retrieved December 12, 2024, from http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1017-85462001000100010&lng=en&tlng=es.
- Vreeland, R. H., & Hochstein, L. I. (2020). *The Biology of Halophilic Bacteria*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003069140>
- Woolard, C. R., & Irvine, R. L. (1994). Biological Treatment of Hypersaline Wastewater by a Biofilm of Halophilic Bacteria. *Water Environment Research*, 66(3), 230–235. <http://www.jstor.org/stable/25164692>

Consideraciones estadísticas en los ensayos de investigación preclínica

Sarah Eliuth Ochoa Hugo¹, Genaro David Santillán Dávila² y Rodolfo Hernández Gutiérrez^{1*}

¹Laboratorio de Investigación Traslacional de Terapias contra el Cáncer, Unidad de Biotecnología Médica y Farmacéutica, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Guadalajara Jalisco.

²Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Guadalajara. Guadalajara Jalisco.

*Autor de correspondencia: rhgutierrez@ciatej.mx

Resumen

Palabras clave:

análisis estadístico, análisis de varianza, evaluación preclínica de medicamentos, Lean Six Sigma.

Durante la última década, el deficiente análisis estadístico de datos obtenidos a partir de ensayos de investigación preclínica ha representado una de las principales causas de la falta de reproducibilidad de resultados en otros laboratorios, tanto de la academia como de la industria durante el proceso de desarrollo de nuevos fármacos. En este trabajo se hace una recapitulación de los conceptos estadísticos relevantes al realizar el análisis de ensayos de investigación preclínica, como lo son: la desviación y error estándar, distribución de probabilidad, distribución normal, t de student, nivel e intervalos de confianza, percentiles y valor de p, prueba de hipótesis, ANOVA y, prueba de Tukey. Así mismo, se describe el alcance de la filosofía Lean Six Sigma y su aplicación en ensayos preclínicos como respuesta a la necesidad de confiabilidad, repetibilidad y reproducibilidad en los resultados.

Introducción

Los ensayos preclínicos desempeñan un papel muy importante en el proceso de desarrollo de nuevos fármacos. Sin embargo, una gran proporción de los resultados de ensayos preclínicos, no se asemejan a los resultados obtenidos en los estudios clínicos. Los artículos científicos publicados suelen presentar baja reproducibilidad, lo cual se atribuye a sesgos que pueden ocurrir en diferentes etapas de la experimentación, así como en el análisis estadístico de los datos obtenidos para un correcto reporte de resultados (Prinz et al., 2011).

Los ensayos de investigación preclínica tienen por objetivo determinar si un posible fármaco tiene posibilidades de conver-

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 29-47.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14706445>

Recibido: 09 octubre 2024
Revisado: 01 de noviembre 2024
Aceptado: 1 de diciembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



tirse en un medicamento de uso humano frente a una enfermedad en particular. Durante el proceso de desarrollo de nuevos fármacos, la investigación preclínica llevada a cabo tanto en laboratorios académicos como a nivel industrial hace uso de la estadística para observar patrones, tendencias, variaciones entre mediciones y comparar entre lo observado en la academia y en la industria, en donde se presentan sesgos importantes en los resultados y limitaciones relacionadas con la repetibilidad y reproducibilidad de los estudios (Yenduri & Silver, 2023).

En este trabajo se hace una recapitulación de los conceptos estadísticos relevantes al realizar el análisis de ensayos de investigación preclínica y del alcance de la filosofía Lean Six Sigma como respuesta a la necesidad de confiabilidad, precisión, repetibilidad y reproducibilidad en los resultados. Para esto se realizó una búsqueda bibliográfica en bases de datos como PubMed, EBSCO, Medigraphic, ClinicalKey, Elsevier y GoogleScholar. Se incluyeron guías de The Council for Six Sigma, American Society for Quality y artículos publicados en idioma inglés y español. Los términos de búsqueda utilizados fueron: análisis estadístico, Lean Six Sigma, análisis de varianza, evaluación preclínica de medicamentos.

Desarrollo

Ensayos preclínicos

Proceso de desarrollo de nuevos fármacos

El desarrollo de nuevos fármacos contra alguna enfermedad en específico es un proceso costoso en términos de tiempo, trabajo y recursos económicos (ver figura 1). Este proceso comienza con los ensayos preclínicos en los laboratorios de experimentación, siendo los más comúnmente empleados aquellos tanto *in vitro* como *in vivo*. Los estudios *in vitro* (fuera de un organismo) utiliza tejidos, órganos o cultivo de células; mientras que los estudios *in vivo* (dentro de un organismo) emplean organismos vivos como modelos animales. Existen también otros tipos de ensayos preclínicos como lo son los ensayos *in silico* (modelos computacionales), *ex vivo* (tejido vivo fuera de su origen) e *in situ* (en su entorno natural) (Bowes et al., 2012).

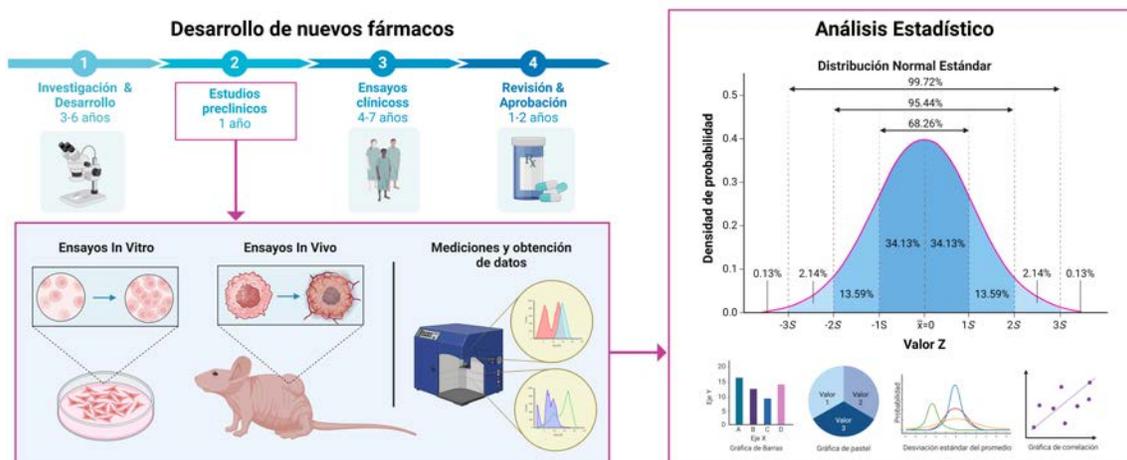


Figura 1. La estadística como parte inherente en la investigación. El desarrollo de nuevos fármacos es un proceso de varias etapas sucesivas: investigación y desarrollo (I+D), ensayos preclínicos, ensayos clínicos, revisión y aprobación. Los datos obtenidos de las experimentaciones preclínicas, más no limitativas a esta etapa, deben analizarse estadísticamente según su naturaleza para obtener resultados que contribuyan a la toma de decisiones. Estos resultados pueden representarse en diferentes tipos de gráficas dependiendo de lo que se desee analizar. S: desviación estándar. \bar{X} : promedio o media aritmética. Creado en BioRender.

Tras los resultados esperados de los ensayos preclínicos, el desarrollo de nuevos fármacos continúa con los ensayos clínicos. Los investigadores solicitan a las autoridades sanitarias correspondientes la autorización para llevar a cabo el protocolo de investigación del fármaco en seres humanos. En México, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) es la encargada de supervisar esto. Al obtener una respuesta favorable de la autoridad, se comienza con los ensayos clínicos llevados a cabo en cuatro fases: Fase I, con un grupo de entre veinte y ochenta voluntarios no enfermos para determinar seguridad, efectos secundarios, dosis, toxicidad y vía de administración; Fase II, con cientos de voluntarios enfermos para la evaluación de efectividad y seguridad; Fase III, con una población más grande de voluntarios enfermos para el establecimiento de evidencia sobre efectividad y seguridad en miles de personas en comparación con el medicamento estándar; Fase IV de farmacovigilancia del medicamento distribuido de manera comercial (Aban & George, 2015).

Escalamiento de resultados a la industria

Los ensayos preclínicos son una etapa esencial en el desarrollo de nuevos fármacos, ya que proveen los primeros datos sobre su efectividad, no obstante, entre los científicos de la industria y los de la investigación académica, existe un pensamiento común basado en que los artículos publicados en la literatura son difíciles de reproducir. Mientras que en la academia se llevan a cabo ensayos fenotípicos sobre moléculas o dianas específicas, en las grandes empresas farmacéuticas también se



llevan a cabo cribados de alto rendimiento para el análisis a gran escala de fármacos potenciales. En el año 2011, el científico Florian Prinz de la empresa farmacéutica Bayer, realizó un análisis de los resultados de ensayos preclínicos publicados por diferentes investigadores durante los últimos 48 meses en las áreas de oncología, salud femenina y enfermedades cardiovasculares, para ser replicados en su laboratorio. Este análisis reveló que solo el 20-25% de los resultados de estos ensayos publicados tenían relación con los resultados obtenidos por su equipo de trabajo. Algunas de las razones a las que atribuye esta discordancia son un incorrecto o inapropiado análisis estadístico de resultados, tamaño de muestras insuficientes o incluso, la presión a publicar resultados positivos en revistas reconocidas (Prinz et al., 2011).

Cribado de alto rendimiento

El cribado de alto rendimiento (HTS, por sus siglas en inglés) es la estrategia predominante que utilizan las grandes empresas farmacéuticas en el proceso de desarrollo de nuevos fármacos. El HTS a partir de bases de datos robustas consiste en el tamizaje 10,000 – 100,000 compuestos químicos por día, dirigidos a dianas biológicas a través de la aplicación de la automatización, ensayos miniaturizados, análisis de datos a grande escala y otras estrategias como técnicas computacionales y diseño de fármacos basado en fragmentos (Mayr & Bojanic, 2009). El HTS es la opción ideal cuando se tiene poca información de la diana seleccionada sobre su relevancia en la enfermedad estudiada, su eficacia, novedad y espectro del riesgo potencial que posea. Los formatos de los ensayos HTS pueden ser bioquímicos, basados en interacciones y manipulación de células; estos ensayos a su vez deben ser biológicamente relevantes, sensibles, robustos y de bajo costo (Blay et al., 2020).

La robustez de los ensayos de HTS se puede evaluar con métricas de calidad ideales para su optimización y validación. Ejemplo de esto es el factor Z, el cual es un coeficiente adimensional capaz de reflejar la señal del rango dinámico del ensayo y la variación de los datos asociados a las señales de medición (Bajorath, 2002).

Ensayos fenotípicos

El desarrollo y descubrimiento fenotípico de nuevos fármacos (PDD, por sus siglas en inglés) es la estrategia predominante, más no limitativa, en la investigación biotecnológica orientada al área médica/farmacéutica utilizada en la academia. El enfoque del PDD no se basa en el conocimiento de una molécula o diana específica y en la hipótesis de su rol en alguna enfermedad; al contrario, su importancia se basa en su utilidad para resaltar la complejidad de los mecanismos de enfermedades aún sin ser esclarecidos. Los ensayos que abarca el PDD incluyen modelos *in vitro* e *in vivo*, herramientas de edición genómica, organoides y técnicas de imagenología



validadas por el fenotipo molecular para recapitular de manera realista la biología de la enfermedad estudiada, entre otras (Horvath et al., 2016).

El enfoque de investigación PDD, comparado con el HTS, requiere más tiempo por las características propias de los ensayos, por lo que suele ser menos costoso. Sin embargo, los resultados obtenidos suelen ser analizados estadísticamente por investigadores que buscan obtener resultados favorables, lo que puede resultar en problemas posteriores de repetibilidad y reproducibilidad (Moffat et al., 2017).

El análisis estadístico es una parte inherente de la investigación, ya que guía las decisiones del investigador en cada paso del estudio preclínico desde el diseño de los ensayos experimentales hasta el análisis de los datos obtenidos, determinando la potencial escalabilidad de la molécula, fármaco, diana terapéutica o tecnología estudiada.

Estadística y variabilidad en las mediciones

Estadística descriptiva e inferencial

Una investigación se enfoca en una colección definida de datos u objetos que constituyen una población de interés y con características que pueden ser categóricas o numéricas. Cualquier característica cuyo valor puede cambiar de un dato a otro en la población se denomina variable; por lo general, las letras minúsculas son utilizadas para denotar estas variables. Los datos multivariantes surgen cuando se realizan observaciones en más de una variable y de la misma manera pueden ser numéricos o categóricos (Montgomery, 2007).

La estadística es el conjunto de técnicas orientadas a recolectar, organizar, resumir, presentar, analizar datos y generar conclusiones válidas sobre las características de la fuente de donde se obtuvieron los datos, considerando su variación. Las técnicas estadísticas se pueden dividir en estadística descriptiva y en estadística inferencial.

En la estadística descriptiva se recopilan, organizan, resumen, presentan y analizan datos. Al recopilar datos, es posible que el analista desee resumir y describir las características importantes de los mismos de manera gráfica en histogramas, diagramas de cajas, gráficas de puntos, gráfica de dispersión, etcétera. Otros métodos descriptivos implican el cálculo de medidas numéricas como medias, desviaciones estándar, coeficiente de correlación, entre otros. Los softwares computacionales funcionan como herramientas que ayudan al analista a poder diseñar estas tareas permitiendo tener más tiempo para estudiar los datos y extraer mensajes importantes (Green et al., 2022).

La estadística inferencial es la rama dedicada a generar conclusiones sobre las características de la fuente de donde se obtuvieron los datos, en la que se congregan



las técnicas para generalizar desde una muestra a la población. Después de haber obtenido una muestra de la población, el analista podrá utilizar la información muestral para sacar alguna conclusión o hacer inferencia de alguna clase (Marshall & Jonker, 2011).

En general, la investigación preclínica puede clasificarse en dos categorías (ver figura 2), según el objetivo del ensayo: 1) Estudios en los que se formulan hipótesis o estudios exploratorios (estadística descriptiva), en donde se hace un enfoque en cuestiones poco estudiadas por lo que se evalúa la relación entre una o dos variables en un contexto en particular y, 2) Estudios que retan las hipótesis o estudios confirmatorios (estadística inferencial), en los cuales los ensayos parten de hipótesis definidas para posteriormente obtener datos e interpretarlos con los conceptos de análisis estadísticos que se describen a continuación (Aban & George, 2015).

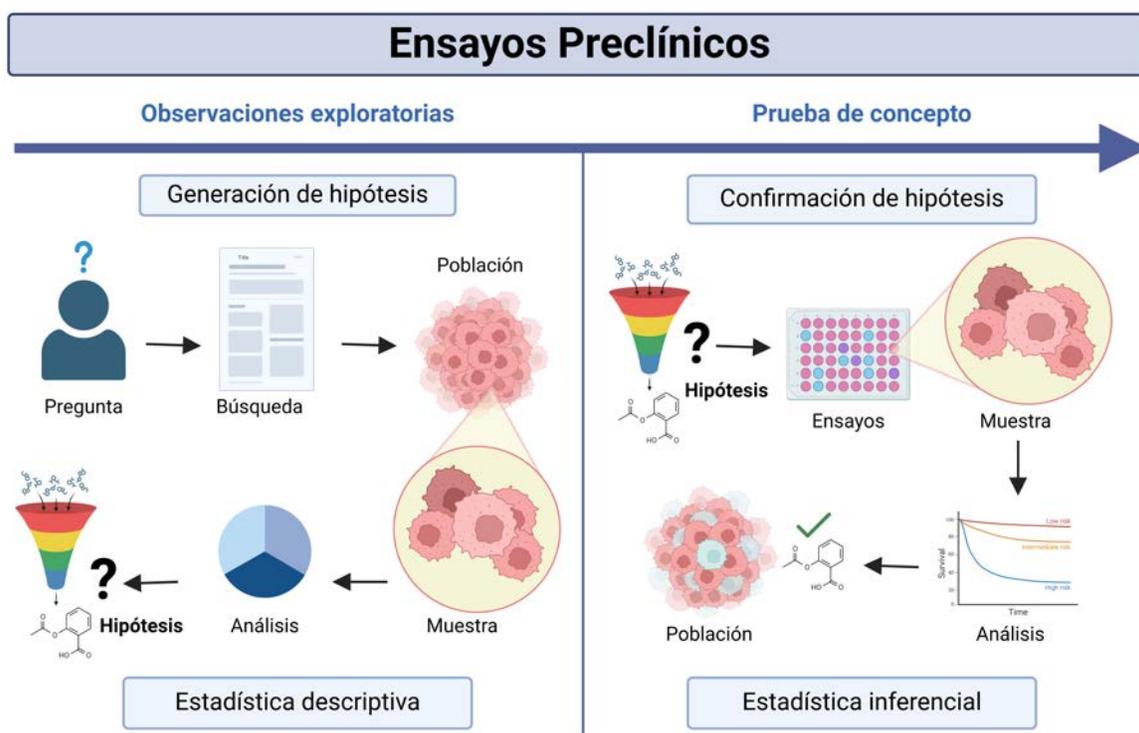


Figura 2. Los ensayos preclínicos se dividen en estudios exploratorios u observacionales y en estudios confirmatorios o de prueba de conceptos. En el primero, lado izquierdo de la figura, los estudios exploratorios toman una muestra de la población para generar una hipótesis mediante el empleo de estadística descriptiva como cálculos numéricos, gráficas y tablas. El segundo, lado derecho de la figura, muestra cómo este tipo de estudios de prueba de concepto parten de una hipótesis ya formulada y se apoya del análisis estadístico de las muestras para inferir que los resultados pueden ser generalizados a la población. Creado en BioRender.



Desviación estándar

La desviación estándar es un parámetro ampliamente utilizado en la estadística inferencial, ya que permite observar la variación de un conjunto de datos y así identificar si existe estabilidad en un ensayo. La desviación estándar es una medida de dispersión e indica qué tan alejados están los datos con respecto a la media (1). Para ello se calcula la distancia que hay entre cada uno de los datos de manera individual x_p , versus la media del conjunto de datos y se denota con la letra S para referirse a la desviación estándar muestral (Devore, 2008).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1)$$

En donde: x , es el valor. \bar{x} , es la media de la muestra. n , es el tamaño de la muestra. Σ , es la suma.

Cuando la diferencia de cada valor individual versus la media es muy pequeña o cercana a cero, entonces la desviación estándar S , tendrá un valor cercano a cero y se dice que hay muy poca variación en el ensayo. Cuando la diferencia es significativamente grande entonces la desviación estándar será mayor a 1 y se dice que hay variación. Para lo anterior, la cantidad de datos n desempeña un papel importante, ya que cuanto mayor es el tamaño de muestra se puede describir con mayor precisión para la toma de decisiones.

Una vez conocida la desviación estándar se pueden realizar más análisis como el cálculo de la varianza o el cuadrado de la desviación estándar S^2 también usado como medida de dispersión, así como, el cálculo del error estándar, intervalos de confianza o pruebas de hipótesis, ya sea para una o más muestras (Yenduri & Silver, 2023).

Error estándar

Cada vez que se realiza una medición bajo estudio, esta va acompañada de cierto tipo de error, conocido como el error estándar el cual necesita ser calculado pues ayuda a determinar qué tan precisas son las estimaciones que se realizan (2). Si el error es cercano al cero, la medición observada es muy cercana a la realidad. Si el error estándar es muy alto, entonces la medición dará un resultado muy diferente a lo que se considera real (Rodrigues et al., 2017):

$$\text{Error estándar} = (S/\sqrt{n}) \quad (2)$$

En donde: S es la desviación estándar de la muestra; n , el tamaño de la muestra.

Una manera de conocer la precisión de una medición es a través de un intervalo de confianza que indica un rango de dónde podría ubicarse el parámetro, es decir, la probabilidad de que este se encuentre entre estos dos valores.



Distribución de Probabilidad

Existen muchas fuentes de variación entre los procesos de estudio, por las diferencias significativas ya que ninguno es igual al otro, como el tiempo requerido para realizar el experimento y los pasos para llevarlo a cabo. Mientras cada elemento se mide, estos pueden ser diferentes entre ellos, pero en grupo forman un patrón que puede describirse como distribución. Las distribuciones se caracterizan de la siguiente manera: 1) Localización, referente al valor central; 2) Dispersión, desde el valor menor al valor más grande y, 3) Forma, patrón de la variación si es simétrica o no (Daimler Chrysler Corporation et al., 2005).

Una distribución de probabilidad es un modelo que explica cómo se relaciona el valor de una variable aleatoria con la probabilidad que tiene esa misma de ocurrir en el ensayo (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2013). Existen dos tipos de distribución:

1. Distribuciones continuas: cuando una variable que se está midiendo se expresa de manera continua y puede contener cualquier valor dentro de los reales $[-\infty, \infty]$.
2. Distribuciones discretas: cuando la variable que se está midiendo solo puede asumir ciertos valores, como enteros 0, 1, 2.

Regularmente en los ensayos preclínicos, la distribución que más se utiliza es la de tipo continua, ya que los datos con los que se estará trabajando son variables cuantitativas.

Distribución normal

Una representación gráfica de los datos es la distribución de probabilidad normal (ver figura 1), la cual asemeja la forma de una campana. La distribución normal es de las más utilizadas en los análisis estadísticos ya que se espera que cualquier ensayo con datos cuantitativos siga un comportamiento similar. La curva de normalidad describe el comportamiento de los datos alrededor de la media, y de forma visual se puede identificar la dispersión de estos. Si la gráfica de distribución normal es ancha de la base, denota que los datos están dispersos por la gran variación que existe entre ellos lo cual infiere que la desviación estándar también es alta. Por el contrario, si la base de la distribución es estrecha, denota que los datos tienen poca dispersión y que hay muy poca variación por lo que la desviación estándar es baja (The Council for Six Sigma, 2018).



Distribución normal estándar (Z)

La distribución normal estándar es útil para realizar inferencias estadísticas respecto a la media y proporciones con muestras grandes. Una forma de apreciar la desviación estándar como medida de dispersión entorno a la media es la desigualdad de Chebyshev a través de la relación entre la media y la desviación estándar (ver figura 1). En esta desigualdad se afirma que el porcentaje de la medición de los datos, que surgen del análisis en los ensayos, caen en los siguientes intervalos:

- a. En el intervalo desde $\bar{X}-1S$ hasta $\bar{X}+1S$, se encuentra el 68.26% de los datos.
- b. En el intervalo desde $\bar{X}-2S$ hasta $\bar{X}+2S$, se encuentra el 95.44% de los datos.
- c. En el intervalo desde $\bar{X}-3S$ hasta $\bar{X}+3S$, se encuentra el 99.72% de los datos.

Esta regla aplica para la mayoría de los casos que tienen un comportamiento similar al de una distribución de probabilidad normal, que busca relacionar cómo la desviación estándar mide la variabilidad entorno a la media (Salas-Parra et al., 2023).

Distribución t de Student

Cuando se realizan ensayos experimentales es necesario que la cantidad de datos seleccionados en el estudio tengan robustez, para lo cual se selecciona un tamaño de muestra grande ($n>30$). Cuanto mayor sea el número de datos analizados estos seguirán una distribución normal. De forma contraria, si por el tiempo, los recursos u otros factores no se pueden realizar ensayos grandes, se selecciona una muestra pequeña; siempre que el tamaño sea menor a treinta ($n<30$) se utilizará la distribución t de Student (3). Una distribución t se rige por un solo parámetro, llamado grados de libertad de la distribución, abreviado como: gl ($n-1$). Este parámetro se denota con la letra griega ν con valores enteros positivos y cada valor del parámetro ν corresponde a una distribución t diferente. La distribución t es útil para determinar intervalos de confianza y pruebas de hipótesis para la media con muestras pequeñas y σ desconocidas. Para lo que se deberá utilizar el valor del estadístico de prueba T en la distribución normal estándar (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2013).

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \quad (3)$$

En donde: T es el estadístico de prueba. \bar{x} es la media de la muestra. μ es la media poblacional. S es la desviación estándar de la muestra. n es el tamaño de la muestra.

Las propiedades que determinan a la distribución t son las siguientes:



1. La variable de interés t , para enfatizar que los datos no siguen una distribución estándar cuando el tamaño de muestra n es pequeña.
2. Cada curva t_v tiene forma de campana y con su centro en 0.
3. Cada curva t_v está más parecida a la campana de la distribución normal estándar, curva (z) .
4. Conforme v incrementa la dispersión de t_v correspondiente disminuye.
5. A medida que v incrementa $\rightarrow \infty$ la secuencia de la curva t_v tiende aproximarse más a la distribución normal estándar, por lo que un tamaño de muestra grande arrastra menor % de error en la estimación puntual.

Se denomina $t_{a,v}$ al valor crítico t y es el número sobre el eje de medición con el área bajo la curva t . Para calcular el valor de $t_{a,v}$ se utilizan las tablas de distribución t de Student o paquetes de software computacionales con v grados de libertad a la derecha de $t_{a,v}$ y a es el nivel de confianza deseado (Devore, 2008).

Nivel de confianza

Una estrategia para determinar el tamaño de muestra necesario al hacer una estimación puntual en el ensayo es primero especificar el nivel de confianza deseado. El nivel de confianza α podría ser del 90, 95 o 99%, pero una estimación por intervalo altamente confiable no siempre puede ser precisa, ya que los puntos extremos del intervalo pueden estar lejos, mientras que un intervalo preciso puede acarrear una confiabilidad relativamente baja debido a que el nivel de confianza del intervalo está relacionado inversamente con su precisión; por lo que, se suele utilizar un nivel de confianza del 95% (NIH, 2024).

Intervalo de confianza

La inferencia y las conclusiones estadísticas sobre algún parámetro, se puede deducir con un intervalo de confianza (IC), reportando la probabilidad de que un parámetro esté contenido en el rango (θ_1, θ_2) . Para ello se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- a. IC para la media y muestras grandes $n > 30$ se utiliza la distribución normal estándar
- b. IC para proporciones, también se utiliza la distribución normal estándar.
- c. IC para la media y muestras pequeñas $n < 30$ y varianza desconocida, se utiliza la distribución t de Student.
- d. IC para la varianza, se utiliza la distribución Ji cuadrada.



Para realizar un intervalo de confianza se debe establecer el nivel de significancia (6), el más utilizado es el 95%, así se espera que el parámetro esté dentro del rango con un 95% de probabilidad (PennState, 2024).

Percentiles y valor de p

El área debajo de la curva entre dos puntos es la probabilidad de que una variable distribuida normalmente asuma un valor entre ellos. Una medida de localización son los llamados cuantiles que dividen al conjunto de datos ordenados en grupos que contienen la misma cantidad de datos. Cuando el área debajo de la curva de la distribución Z se divide en 100 partes iguales se obtienen los percentiles (p). Con cualquier valor p entre 0 y 1, se puede hacer uso de las tablas Z o de un software estadístico para obtener el percentil 100° (ver tabla 1). El 95° percentil de la distribución Z es el valor del eje horizontal, tal que el área debajo de la curva es el 0.9500. Es la pregunta contraria al tratar de encontrar la probabilidad al P ($Z=95\%$), por lo que la tabla se utiliza de manera inversa, encontrar el valor que mejor se acerca al 0.9500; $z= 1.645$. Se denotará al $Z_\alpha = 100(1 - \alpha)^\circ$ percentil de la distribución normal estándar. En un intervalo de confianza, el nivel de significancia esperado es de $1-\alpha$, valor del área que queda a la izquierda de la distribución (Egermann et al., 2015).

Tabla 1. Percentiles normales estándar y valores críticos

Percentil (p)	Nivel de confianza deseado		
	90	95	99
Área de la curva (α)	0.1	0.05	0.01
$Z_\alpha = 100(1-\alpha)$	1.28	1.645	2.33

Fuente: (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2013)

Si el nivel de confianza dentro de un IC es del 95% entonces se utilizará el área de $(1 - \alpha)$, es decir el 0.05 el área debajo de la curva de distribución normal estándar, por lo que su percentil $Z=1.645$. Esta tabla solo aplica para la distribución normal estándar. Si la distribución es distinta entonces se utilizará la tabla correspondiente. Los percentiles aplican para cualquier distribución continua y es útil para calcular niveles de confianza, así como también para pruebas de hipótesis.

Prueba de Hipótesis

La prueba de hipótesis es una metodología utilizada en la toma de decisiones al realizar ensayos preclínicos. El objetivo de una prueba de hipótesis es el de comprobar si cierta observación es verdadera o falsa, por lo que se generan dos hipótesis: la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alterna (H_A). La H_0 es la que se va a probar y siempre incluye a la igualdad, quiere decir que no tiene ningún efecto en lo que se



está midiendo; por otro lado, la H_A se refiere a que el experimento influye significativamente en la variable de respuesta (Wisniewski et al., 2018).

En una prueba de hipótesis el valor p , que puede ser calculado con percentiles de la distribución, reporta la probabilidad de observar un efecto tan grande como aquel que se está midiendo si la H_0 fuera verdadera. Cuanto más pequeño sea el valor p , se puede concluir que la H_0 no se puede aceptar. Cuando la H_0 no se pueda aceptar o comprobar que es verdadera con la evidencia estadística, entonces se define que la variable de interés de salida tiene un efecto en las mediciones de la prueba (Huang et al., 2020).

El nivel de significancia se define al inicio de la prueba. Cuanto más pequeño sea el nivel de confianza ($1 - \alpha$) el efecto para poder detectar si hay relevancia o no también será mínimo. Este valor debe estar predefinido de manera que pudiera detectar que hay una relevancia biológica en el experimento. El nivel de significancia deberá calcularse junto con el tamaño de la muestra y con esto confirmar que el experimento tiene el potencial suficiente de detectar efectos relevantes (The Council for Six Sigma, 2018).

Antes de hacer conclusiones en el análisis, primero se debe probar la hipótesis de que los datos siguen una distribución normal y de ser significativa, no rechazar la hipótesis y tomar la decisión correcta. Si no se realiza la prueba de hipótesis de la normalidad de los datos, no se deberá continuar con el análisis, pues las decisiones tomadas podrían ser erróneas. Si el valor p generado de la prueba es menor que el nivel α ($p < 0.05$) seleccionado, entonces la H_0 se rechaza y la H_A se acepta. Si el valor p generado de la prueba es mayor que el nivel α ($p > 0.05$) se acepta la H_0 por lo que la H_A se rechaza (The Council for Six Sigma, 2018).

Análisis de varianza

El análisis de la varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés), es un procedimiento utilizado para determinar si los datos de tres o más muestras, provenientes de diferentes poblaciones, apuntan diferencias entre las medias de estas poblaciones. Durante la prueba de hipótesis del análisis de la varianza, la H_0 indica que todas las medias de los tratamientos son iguales entre sí, y la H_A , indica que al menos un par de medias es diferente. Los cálculos deben cumplir la suposición de que los datos en ANOVA son independientes y siguen una distribución normal (realizar prueba de hipótesis de normalidad de los datos) y con varianzas iguales (4). La variabilidad total de los datos se mide como la variación de los tratamientos más la variación debido al error (Kubiak & Benbow, 2009).

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_{Tratamientos}^2 + \sigma_{Error}^2 \quad (4)$$



En donde: la variación de los tratamientos $\sigma_{Tratamientos}^2$, se calcula como la suma de los cuadrados de las diferencias del promedio de cada dato y el gran promedio total; la variación debido al error σ_{Error}^2 , se calcula como la suma de los cuadrados de las diferencias con los tratamientos y el promedio del tratamiento.

Las partes que componen a la variación son las que se muestran en la tabla resultado del estudio ANOVA, a través de software de computadora (ver tabla 2). En donde k son los números de muestras (tratamientos), n es el número de lecturas por tratamiento y, N es la cantidad total de datos. La media de los cuadrados del error es la variación total del estudio y se espera que sea menor a la variación entre los tratamientos. El estadístico F compara la variación entre tratamientos y la variación debido al error.

Tabla 2. Análisis de la varianza y fuentes de variación

Fuentes de variación	Suma de los cuadrados (SC)	Grados de libertad	Media de los cuadrados (MC)	Estadístico F	Valor-p
Variación debido a los tratamientos	$SC_{Tratamientos}$	k-1	$MC = \frac{SCt}{k-1}$	$F_0 = \frac{MCt}{MCE}$	p < 0.05
Variación debido al error	SC_{error}	N-k	$MCE = \frac{SCe}{N-k}$		
Variación Total	SC_{Total}	N-1			

Fuente: (Kubiak & Benbow, 2009)

Si la MCE es muy grande comparado con MC, entonces el valor F_0 será muy pequeño y no se puede considerar el estudio ANOVA como aceptable. Si MC es más grande, se tendrá que hacer la prueba de hipótesis con el valor α seleccionado previamente. Cuando el valor p sea menor que α (0.05) entonces la H_0 se rechaza y se concluye que al menos un par de medias es diferente. Si el valor p es mayor que α (0.05) entonces la H_0 se acepta y se infiere que la media de los tratamientos es igual entre sí.

Prueba de Tukey

La prueba de ANOVA puede detectar si todas las medias de los tratamientos son iguales o al menos algún par es diferente, pero no puede determinar cuál es el distinto. La prueba de Tukey es utilizada para comparar cada una de las medias en pares e indicar si esos pares son iguales o distintos. El estadístico de prueba de Tukey se calcula con la raíz cuadrada del MCE contra el tamaño de muestra de cada una de ellas a un nivel de significancia α . Después, se compara la diferencia de medias formando pares: la media de la muestra uno contra la media de la muestra dos, media de la muestra uno contra la media de la muestra tres y así sucesivamente hasta terminar de formar todos los pares posibles. Cualquier par de tratamientos en donde



la diferencia de medias sea mayor que el estadístico de Tukey, implica que este par de muestras son diferentes entre sí (Montgomery, 2013).

Lean Six Sigma

A nivel industrial existen estrategias útiles para la gestión de la calidad, las cuales pueden ser aplicadas en el análisis de los procesos y de los pasos que se llevan a cabo durante los ensayos de investigación tanto preclínica como clínica. A partir del año 2000, en Estados Unidos de América se comenzó a implementar la filosofía Lean Six Sigma en proyectos para la mejora de la calidad en los servicios de salud a nivel hospitalario, dando resultados positivos. Sin embargo, cuando se habla de la estrategia Lean Six Sigma, regularmente se piensa en un solo concepto, pues ambos, Lean Manufacturing y Six Sigma, se enfocan en la calidad de los procesos, pero en realidad se trata de dos filosofías (Schweikhart & Dembe, 2009).

Six Sigma

La filosofía Six Sigma es utilizada para mejorar la calidad y la eficiencia de los procesos operacionales, esta se enfoca en hacer procesos más uniformes y precisos a través de la aplicación de herramientas estadísticas. El objetivo principal de Six Sigma es el de reducir la variación para mejorar la calidad a un nivel de competitividad mundial, lo que implica tener un desempeño de proceso de 3.4 defectos por millón de oportunidades (y su estabilidad en el tiempo, considerando que la media se puede desplazar 1.5 veces la desviación estándar). La perspectiva filosófica de Six Sigma es ver todas las actividades como un proceso que necesita ser definido, medido, analizado, mejorado y controlado (DMAIC, por sus siglas en inglés). Six Sigma como conjunto de herramientas incluye técnicas cualitativas (mapeo de procesos) y cuantitativas (análisis estadístico), que pueden ser conducidas por un experto para llevar a cabo el proceso de mejora (Munro et al., 2015).

Lean Manufacturing

Por otra parte, Lean Manufacturing involucra una serie de principios, métodos y prácticas que ayudan a diseñar, mejorar y administrar una organización. El principal objetivo de Lean es mejorar la eficiencia eliminando los desperdicios que pueden llegar a absorber tiempo y recursos, pero sin agregar valor: sobre producción, sobre inventarios, área, transporte, movimientos, tiempo de espera o mala calidad. Una de las principales herramientas es el mapeo del flujo de valor (VSM, por sus siglas en inglés) que ayudan a identificar de manera visual los pasos requeridos para completar una tarea con la finalidad de observar los recursos que están involucrados como personal clave, flujo de información y actividades, de manera que se puedan iden-



tificar las oportunidades e integrar los pasos del proceso en términos de eficiencia (The Council for Six Sigma, 2018).

Lean Six Sigma en ensayos preclínicos

Las metodologías Lean Six Sigma fueron desarrolladas en el complejo ambiente de manufactura y sistemas ingenieriles en donde la calidad, la precisión y el consumidor son puntos tan críticos para el éxito de los proyectos como lo son en la investigación biomédica, durante el proceso de desarrollo de nuevos fármacos tanto en ensayos preclínicos como clínicos.

Son pocos los reportes en la literatura sobre la aplicación de Lean Six Sigma en los ensayos preclínicos en comparación con los ensayos clínicos y servicios de salud. Sin embargo, Lean Six Sigma se ha recomendado para evitar contaminación cruzada en cultivos celulares (Lindgren, 2008) y para reducir errores de laboratorio en diferentes disciplinas incluyendo la biología molecular, hematología, citología, microbiología y patología (Hollensead et al., 2004). De igual manera, esta filosofía se ha direccionado al aseguramiento de la calidad en laboratorios farmacéuticos e industrias relacionadas; el ejemplo más reciente es la empresa internacional de biotecnología Novozymes, en donde se aplicó un enfoque Lean Six Sigma para analizar la cultura de la empresa, el flujo de los procesos, y el trabajo de los analistas responsables de llevar a cabo ensayos preclínicos, dando como resultado la implementación de la metodología 5S mediante cinco pasos (clasificar, ordenar, limpiar, estandarizar, mantener) logrando así una mejor utilización de los espacios de trabajo de cada analista en el laboratorio (Shanley, 2020).

Lean Six Sigma en ensayos clínicos

Las metodologías Lean Six Sigma son aplicables en la parte preclínica y clínica del proceso de desarrollo de nuevos fármacos debido a la evidente necesidad de precisión estadística, calidad en las mediciones durante las experimentaciones y reproducibilidad de los ensayos en el laboratorio. Se han reportado en la literatura casos de éxito en la aplicación de Lean Six Sigma en la práctica clínica. Por ejemplo, en laboratorios clínicos donde se ven reducidos errores en los sistemas de captura de la información de pacientes (Riebling N, 2005), se manejan los volúmenes necesarios para análisis sanguíneos (Elder, 2008), se asegura la repetibilidad y reproducibilidad de ensayos anticoagulantes en diferentes laboratorios de una comunidad (Hurley et al., 2008) y se establece un flujo de trabajo eficiente y continuo dentro de un laboratorio histológico hospitalario (Schweikhart & Dembe, 2009).

En la actualidad, son numerosas las organizaciones que han implementado la estrategia Lean Six Sigma en la mejora del desempeño ya que es un conjunto de he-



ramientas sumamente útiles para ayudar a incrementar la eficiencia y la efectividad de los procesos reduciendo al mínimo los errores.

Conclusiones

Los ensayos preclínicos son esenciales en el proceso de desarrollo de nuevos fármacos al proveer los primeros datos sobre la efectividad de una nueva terapia. El análisis estadístico de estos datos debe estar alineado a las características propias del ensayo, es decir, para obtener resultados confiables, repetibles y reproducibles se deben aplicar los conceptos estadísticos que correspondan a la naturaleza de este.

Se propone la implementación de la filosofía Lean Six Sigma en las actividades diarias realizadas por todo analista dentro de un laboratorio de investigación mediante la estandarización de metodologías, el análisis y solución de problemas desde la causa raíz reduciendo así las fuentes de variación de manera sistémica, aumentando la eficacia de los procesos y el éxito de los ensayos preclínicos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Agradecimientos

Sarah Eliuth Ochoa Hugo con CVU 891162 agradece a CONAHCYT por la beca otorgada para su formación en el programa de Doctorado en Ciencias en Innovación Biotecnológica de CIATEJ. Fondo CONAHCYT, FORDECYT-PRONACES/568483/2020.

Referencias

- Aban, I. B., & George, B. (2015). Statistical Considerations for Preclinical Studies. *Experimental Neurology*, 270, 82. <https://doi.org/10.1016/J.EXPNEUROL.2015.02.024>
- Bajorath, J. (2002). Integration of virtual and high-throughput screening. *Nature Reviews Drug Discovery*, 1(11), 882-894. <https://doi.org/10.1038/nrd941>
- Blay, V., Tolani, B., Ho, S. P., & Arkin, M. R. (2020). High-Throughput Screening: today's biochemical and cell-based approaches. *Drug Discovery Today*, 25(10), 1807–1821. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2020.07.024>
- Bowes, J., Brown, A. J., Hamon, J., Jarolimek, W., Sridhar, A., Waldron, G., & Whitebread, S. (2012). Reducing safety-related drug attrition: The use of *in vitro* pharmacological profiling. *Nature Reviews Drug Discovery*, 11(12), 909-922. <https://doi.org/10.1038/nrd3845>



- Daimler Chrysler Corporation, General Motors Corporation, & Ford Motor Company. (2005). *Statistical Process Control (Segunda Edición)*. Automotive Industry Action Group.
- Devore, J. L. (2008). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias (Séptima Edición)*. Cengage Learning.
- Egermann, H., Fernando, N., Chuen, L., & McAdams, S. (2015). P-values as percentiles. Commentary on: “Null hypothesis significance tests. A mix-up of two different theories: the basis for widespread confusion and numerous misinterpretations”. *Frontiers in Psychology*, 6(JAN), 411–432. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2015.00341>
- Elder, B. L. (2008). Six Sigma in the microbiology laboratory. *Clinical Microbiology*, 30(19), 143-147. <https://doi.org/10.1016/j.clinmicnews.2008.09.001>
- Green, J. L., Manski, S. E., Hansen, T. A., & Broatch, J. E. (2022). Descriptive statistics. En R. J. Tierney, F. Rizvi & K. Ercikan (eds.), *International Encyclopedia of Education: Fourth Edition* (pp. 723–733). Elsevier Science <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818630-5.10083-1>
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2013). Herramientas básicas para Seis Sigma. En *Control Estadístico de La Calidad y Seis Sigma* (pp. 134–164). McGrawHill.
- Hollensead, S. C., Lockwood, W. B., & Elin, R. J. (2004). Errors in pathology and laboratory medicine: consequences and prevention. *Journal of Surgical Oncology*, 88(3), 161–181. <https://doi.org/10.1002/JSO.20125>
- Horvath, P., Aulner, N., Bickle, M., Davies, A. M., Nery, E. Del, Ebner, D., Montoya, M. C., Östling, P., Pietiäinen, V., Price, L. S., Shorte, S. L., Turcatti, G., Von Schantz, C., & Carragher, N. O. (2016). Screening out irrelevant cell-based models of disease. *Nature Reviews Drug Discovery*, 15(11),751–769). <https://doi.org/10.1038/nrd.2016.175>
- Huang, W., Percie du Sert, N., Vollert, J., & Rice, A. S. C. (2020). Good Research Practice in Non-Clinical Pharmacology and Biomedicine. *Handbook of Experimental Pharmacology*, 257, 55. https://doi.org/10.1007/164_2019_277
- Hurley, B., Taylor, T., Levett, J., Huber, C., & Hahn, E. (2008). Implementation of six sigma and lean methodology into the anticoagulation management process. *Journal of Thrombosis and Thrombolysis*, 25(1), 106–106. <https://doi.org/10.1007/S11239-007-0148-Z>
- Kubiak, T. M., & Benbow, D. W. (2009). *The Certified Six Sigma Black Belt Handbook*. ASQ Quality Press - Scientific Research Publishing. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1790270>



- Lindgren, V. (2008). To err is human; to follow the SOP divine. *International Journal of Cancer*, 123(4), 979–980. <https://doi.org/10.1002/IJC.23567>
- Marshall, G., & Jonker, L. (2011). An introduction to inferential statistics: A review and practical guide. *Radiography*, 17(1), e1-e6. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2009.12.006>
- Mayr, L. M., & Bojanic, D. (2009). Novel trends in high-throughput screening. *Current Opinion in Pharmacology*, 9(5), 580–588). <https://doi.org/10.1016/j.coph.2009.08.004>
- Moffat, J. G., Vincent, F., Lee, J. A., Eder, J., & Prunotto, M. (2017). Opportunities and challenges in phenotypic drug discovery: An industry perspective. *Nature Reviews Drug Discovery*, 16(8), 531–543. <https://doi.org/10.1038/nrd.2017.111>
- Montgomery, D. (2007). *Control estadístico de la calidad (Tercera Edición)*. Limusa Wiley.
- Montgomery, D. (2013). *Design and analysis of experiments (Octava Edición)*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Munro, R. A., Ramu, G., & Zrymiak, D. J. (2015). *The Certified Green Belt Handbook (M. T. Meinholz, Ed.; Segunda Edición)*. American Society for Quality.
- National Library of Medicine. (s.f.). *Common Terms and Equations*. Recuperado el 11 de diciembre de 2024 de <https://www.nlm.nih.gov/oet/ed/stats/02-950.html>
- PennState. (2024). *Introduction to Confidence Intervals | STAT 200*. The Pennsylvania State University. <https://online.stat.psu.edu/stat200/lesson/4/4.2>
- Prinz, F., Schlange, T., & Asadullah, K. (2011). Believe it or not: how much can we rely on published data on potential drug targets? *Nature Reviews. Drug Discovery*, 10(9), 712–713. <https://doi.org/10.1038/NRD3439-C1>
- Riebling N, T. L. (2005). Six sigma project reduces analytical errors in an automated lab. *MLO: medical laboratory observer*, 37(6), 20–23. . <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16028478/>
- Rodrigues, C. F. de S., Lima, F. J. C. de, & Barbosa, F. T. (2017). Importance of using basic statistics adequately in clinical research. *Brazilian Journal of Anesthesiology (English Edition)*, 67(6), 619–625. <https://doi.org/10.1016/j.bjane.2017.01.011>
- Salas-Parra, R. D., Castro-Ochoa, K. J., & Machado-Aranda, D. A. (2023). Basic science statistics. En A. E.M. Eltorai, J. A. Bakal, P. C. Newell & A. J. Osband (eds.), *Translational Surgery* (pp. 195–199). Academic Press <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90300-4.00022-7>
- Schweikhart, S. A., & Dembe, A. E. (2009). The Applicability of Lean and Six Sigma Techniques to Clinical and Translational Research. *Journal of Investigative Medicine : The Official Publication of the American Federation for Clinical Research*, 57(7), 748. <https://doi.org/10.231/JIM.0B013E3181B91B3A>



- Shanley, A. (2020). *Using Six Sigma and QbD to Improve Preclinical R&D*. <https://www.pharmtech.com/view/bringing-six-sigma-to-preclinical-pharma-r-d>
- The Council for Six Sigma. (2018). *Six Sigma: a complete step-by-step guide*. The Council for Six Sigma.
- Wisniewski, C. S., Jones, E. P., Weeda, E. R., Pilch, N. A., & Picone, M. F. (2018). Medical literature evaluation and biostatistics. En D. Thomas (ed.), *Clinical Pharmacy Education, Practice and Research: Clinical Pharmacy, Drug Information, Pharmacovigilance, Pharmacoeconomics and Clinical Research* (pp. 143–162). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814276-9.00010-6>
- Yenduri, R., & Silver, R. E. (2023). Basic statistical principles. En A. E.M. Eltorai, J. A. Bakal, P. C. Newell & A. J. Osband (eds.), *Translational Surgery* (pp. 139–143). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90300-4.00049-5>



Formulación de una bebida de jamaica con potencial hipoglucemiante a partir de proteína hidrolizada de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)

Eduardo López-Ornelas¹, Jonhatan Contreras-Negrete², Luis Mojica² y Montserrat Alcázar-Valle^{2*}

¹Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), Ingeniería en Biotecnología, Tlaquepaque, Jalisco, México

²Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), Unidad de Tecnología Alimentaria, Zapopan, Jalisco, México

*Autor de correspondencia: ealcazar@ciatej.mx

Resumen

Palabras clave:

diabetes, formulación, péptidos de frijol, prediabetes.

Se realizaron dos formulaciones de bebidas a partir de infusiones de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) con potencial hipoglucémico y de aporte nutricional. Estas bebidas se prepararon con hidrolizado de proteína de frijol (HPF 1 y 2%), Inulina de agave (2%), goma de xantana (0.04%), pectina (0.1%) y sucralosa (0.01%), todos los ingredientes mostraron un efecto sinérgico para lograr inhibir las enzimas α -glucosidasa y α -amilasa hasta en un 86% y 90% respectivamente. Los resultados de las pruebas fisicoquímicas fueron acordes a los reportados para bebidas de jamaica, y se obtuvo una buena aceptación en las pruebas sensoriales, superado el nivel de agrado en la percepción de sabores respecto a la bebida control.

Introducción

La diabetes es una de las enfermedades crónicas que causa mayor número de muertes en todo el mundo cada año. Afecta a las personas, reduciendo significativamente su calidad de vida. Si no se controla adecuadamente, la diabetes puede acabar provocando complicaciones de salud graves y la muerte.

Las causas de esta enfermedad son multifactoriales, se debe principalmente a factores genéticos, ambientales o ambos (Tuomi, 2005). La diabetes tipo 2 se caracteriza por el desarrollo de resistencia a la insulina, llegando al punto que las células dejan de producir esta proteína (Goyal et al., 2023), dando como resultado un trastorno metabólico crónico caracterizado por hiperglucemia (glucosa alta en sangre) persistente, lo que posteriormente

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 49-62.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14706599>

Recibido: 05 octubre 2024
Revisado: 27 de noviembre 2024
Aceptado: 08 de enero 2025
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



puede causar mayor riesgo de infarto de miocardio, accidentes cerebrovasculares, amputación e insuficiencia renal (Shivashankar & Mani, 2011).

La diabetes tipo 2 es más frecuente en personas mayores de 45 años, aunque la obesidad, sedentarismo y dietas ricas en calorías han significado un aumento en este tipo de diabetes en niños y adolescentes (Goyal et al., 2023). Un estadio previo al desarrollo es la prediabetes en el cual las personas al desarrollar la resistencia a la insulina comienzan a tolerar e incrementar sus niveles de glucosa en sangre y la insulina no los normaliza. Si esta condición no se trata por medio de dietas o medicamentos que reduzcan la glucosa en sangre, provocará la diabetes tipo 2 en la persona (Shivashankar & Mani, 2011).

Una de las mejores maneras para controlar los estados hiperglucémicos es una dieta balanceada y actividad física (Barnes, 2011). En muchas ocasiones la glucosa en sangre en personas con prediabetes o diabetes tipo 2 puede tener un gran desbalance por una simple comida, lo que abre la necesidad de generar productos con propiedades bioactivas que permitan regular la cantidad de glucosa en sangre. Estudios previos han demostrado que los hidrolizados de proteína de frijol (HPF) común negro (*Phaseolus vulgaris* L.) tienen potencial hipoglucemiante. Estos hidrolizados mostraron buenos resultados en pruebas de inhibición enzimática en α -amilasa y α -glucosidasa (relacionadas en la liberación de glucosa en sangre), pruebas *in vitro*, *in vivo* y también en estudios clínicos, todos relacionados con la disminución de glucosa (Mojica & de Mejía, 2016; Mojica et al., 2017; Mojica et al., 2024).

Una posible presentación comercial para administrar HPF es por medio de una bebida sin calorías, ya que esta presentación preserva mejor a los péptidos y es más fácil de consumir. Además, hoy en día están tomando relevancia las bebidas con altos contenidos de proteína. Sin embargo, unas de las principales problemáticas de utilizar hidrolizados de proteína (HPF) en bebida son las propiedades sensoriales (olor, color, textura y/o sabor) desagradables, mala estabilidad y pérdida de bioactividad (Lee, 2011; Leksrisonpong et al., 2012; Goudarzi et al., 2015). El objetivo del presente estudio es formular una bebida funcional, del agrado del consumidor, con una buena estabilidad y con propiedades hipoglucemiantes.

Para poder enmascarar las propiedades sensoriales se busca utilizar una infusión de flor de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) concentrada, la cual aparte de aportar buen sabor, color y ser una de las bebidas más consumidas en México, también tiene muchas propiedades como: antocianinas, ácidos orgánicos, flavonoides, saponinas, fitoesteroles, fibra, minerales como calcio, hierro, magnesio y zinc, vitaminas B1, B2, C, D y E, además de contar con los aminoácidos esenciales, excepto el triptófano (Quiroz et al., 2022).



También se pueden adicionar componentes a la formulación como hidrocoloides. La pectina y goma de xantana son componentes que mejoran la solubilidad, alargan la vida de anaquel e incluso aportan buenas características sensoriales (Contreras-Lozano et al., 2019). Estos componentes son fuente de fibra, fungen como prebióticos e incluso reportan propiedades hipoglucémicas (en específico la pectina) (Chaturvedi et al., 2021; Muñoz-Almagro et al., 2021), incluso su combinación aporta a la estabilidad de péptidos (Garzón et al., 2024). Otro componente que se buscó adicionar es la inulina de agave que funge como prebiótico, en funciones inmunológicas, biodisponibilidad de minerales, mejoramiento de metabolismo de grasas y reducir respuestas glicémicas (Fuquene-Munar & Arenas, 2018).

Materiales y métodos

Formulación de bebidas por fases

Se realizó la infusión de flor de jamaica (*H. sabdariffa*), esta se obtuvo de comercios locales en Guadalajara, Jal. 70 g de flor seca se disolvieron en 700 mL de agua y se calentaron por 7 min. Se dejó reposar en un recipiente cerrado por 5 min, se filtró y se obtuvo un volumen final de 600 mL de infusión.

Posteriormente, se realizó una dilución 1:2 de la infusión concentrada y se agregó 0.01% de sucralosa (Ingredion®) para después ser combinada con las concentraciones de hidrocoloides y fibras.

Una vez obtenida la infusión, se enfrió y se adicionaron los hidrocoloides y fibras: goma de xantana (GX), pectina (P) e inulina de agave. Se determinó su consistencia y turbidez por medio de un turbidímetro (HI88703-01, Hanna Instruments, Woonsocket, EUA). Las concentraciones utilizadas se basaron en las reportadas en la literatura (Garzón et al., 2024).

Finalmente, se adicionó el HPF, se decidió usar 2% de los péptidos al haber demostrado buenos resultados en los estudios clínicos (Mojica et al., 2024). Además, se formuló una segunda bebida con una reducción de HPF al 1% para comparar la aceptación en las pruebas sensoriales (Tabla 1).

Tabla 1. Formulación bebida de jamaica con 1% y 2% de HPF

Ingrediente	Bebida 1	Bebida 2
HPF %	1	2
Inulina %	2	2
Goma X %	0.04	0.04
Pectina %	0.1	0.1
Sucralosa %	0.01	0.01

Fuente: propia



Análisis fisicoquímicos

Los análisis fisicoquímicos que se realizaron en las bebidas 1 y 2 fueron: pH, turbidez, viscosidad, °Brix y color.

La medición de pH se realizó de acuerdo a lo establecido por la NMX-F-317-NORMEX-2013, utilizando un potenciómetro de bolcillo (pHep+® HI98108, Hanna Instruments, Woonsocket, EUA). Para el análisis de turbidez se utilizó un turbidímetro (HI88703-01, HANNA, Woonsocket, EUA). Para la viscosidad se utilizó un viscosímetro (ROTAVISC lo-vi Complete, IKA, Staufen, Alemania). La sonda que se utilizó fue SP-1, la temperatura fue de 25 °C y la velocidad de corte en ambas mediciones fue de 100 rpm. En este caso la recomendación de torque para buenas lecturas es a partir de 10%.

También se midieron los °Brix con un refractómetro-brixómetro (MASTER, ATAGO CO., Saitama, Japón), por último, se analizó el color de las dos muestras mediante un espectrofotómetro (CM-5, Konica Minolta Sensing Americas, Ramsey, EUA). Se ajustó el blanco con agua destilada, para después analizar por triplicado las muestras.

Análisis sensorial

Se realizó un análisis sensorial de las bebidas 1 y 2 para determinar la aceptación y la intensidad de sabores que había en las dos muestras. La metodología que se siguió fue la reportada en la literatura (Inca, 2024; Lee, 2011) con algunas modificaciones, en donde se dieron escalas (1-10) para determinar la aceptabilidad de las personas (1 = disgusto y 10 = mayor aceptabilidad). Los parámetros considerados se dividieron en dos categorías.

La primera categoría fue la del nivel de agrado, la cual se compone de: aceptabilidad general, textura, color, probabilidad de compra. La segunda categoría se relacionó con el nivel de intensidad de sabores: dulzor, amargor y acidez.

El estudio sensorial se realizó con 21 personas, se les indicó que no consumieran nada de alimentos y bebidas al menos una hora antes de la prueba. Se pidió a todas las personas que probaran tres bebidas: el control (Be light de Jamaica ®), bebida 1 y bebida 2. Entre cada prueba se les pidió que enjuagaran su boca con agua natural para que el sabor residual no afectara la prueba.

Cuantificación de proteína de HPF

Para la cuantificación de proteína se utilizó el método de Lowry (Shen, 2023). Se realizó una curva de calibración con Albúmina de Suero Bovino (BSA) como estándar a concentraciones de 0 a 1500 µg/ml.

Inhibición de α -glucosidasa

Para determinar la bioactividad de los péptidos se cuantificó la inhibición de la enzima α -glucosidasa (Figura 1). Se utilizó el inhibidor Acarbosa como control positivo, el sustrato de la reacción fue p-Nitrofenil- α -Dglucopiranosido (p-NFGP).

Se preparó un tampón fosfato salino (PBS) 0.1 M a pH 6.9, la solución con α -glucosidasa 1 unidad/mL, la solución de p-NFGP se hizo a 5 mM y el control positivo Acarbosa a 1 mM.

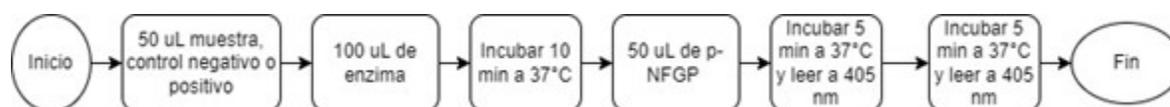


Figura 1. Proceso de reacción para determinar la inhibición de α -glucosidasa
Fuente: propia

Inhibición de α -amilasa

Para la prueba de inhibición de α -amilasa se utilizó como sustrato almidón, la acción de la enzima sobre el sustrato libera maltosa, glucosa y dextrinas (Qian et al., 2023). Los azúcares reductores liberados se midieron mediante 3,5-dinitrosalicílico (DNS). Además, se preparó una solución tampón fosfato salino (PBS) 0.02 M pH 6.9, se preparó la solución del ácido 3,5-dinitrosalicílico. La enzima α -amilasa se preparó a 13 unidades/mL, mientras que el sustrato (almidón) se preparó en una solución al 1%. Se preparó acarbosa a 1 mM como control positivo (Figura 2).



Figura 2. Proceso de adición de reactivos y muestras para la reacción DNS
Fuente: propia

Cuantificación de compuestos fenólicos

La cantidad de compuestos fenólicos se analizó mediante el método Folin-Ciocalteu (Mohd-Esa et al., 2010). La curva de calibración se realizó con ácido gálico como estándar (0 - 60 μ g/mL).



Resultados y discusión

Análisis fisicoquímicos

En la Tabla 2 se muestran los resultados fisicoquímicos que se obtuvieron al analizar la bebida 1 y bebida 2.

Tabla 2. Resultados fisicoquímicos para las dos muestras finales con HPF al 1% y 2%

Fisicoquímicos	Bebida 1	Bebida 2
PH	3.0	3.3
Turbidez (NTU)	1781 ± 15.5	3129 ± 26.8
Viscosidad (cP)	8.40	9.69
Sólidos suspendidos (°Brix)	4.10 ± 0.4	5.00 ± 0.7

Se muestran resultados promedio (n =2) ± indica la desviación estándar

Fuente: propia

Se estima que una bebida de jamaica natural ronda entre 2.11 – 3.66 de pH (Torres et al., 2019), por lo que las formulaciones realizadas se encuentran dentro de estos rangos. Sin embargo, los valores de turbidez obtenidos se encuentran por arriba de los reportados en la literatura de 150 a 1500 NTU para bebidas con pulpa o infusiones (Paquet et al., 2014). Paquet et al. (2014) reportan que, aunque las fibras e hidrocoloides ayudan a mantener las propiedades bioactivas y fisicoquímicas de las bebidas, también aportan a la turbidez en algunos casos.

En cuanto a la viscosidad, los valores obtenidos se encuentran dentro de lo reportado por la literatura de 1.39-15.90 cP (Quiroz et al., 2022), según el grado de adición de hidrocoloides. Respecto a los °Brix, se esperaba obtener valores más bajos al no tener azúcares añadidos en las bebidas, pero en la literatura se reporta que componentes como inulina (Valencia-Sandoval et al., 2020), hidrocoloides e hidrolizados (Inca, 2024) pueden incrementar este valor.

Los resultados de color se muestran en la tabla 3, en donde se muestran los valores promedio de L*, a*, y b*. Al aumentar el porcentaje de péptido se disminuyó la luminosidad (L*), la tendencia hacia el rojo (a*) y hacia el amarillo (b*), lo que hace que a medida que aumente la concentración de HPF se reste claridad y coloración rojiza. Los valores obtenidos en el presente estudio son muy similares a los reportados por Torres et al. (2019) al realizar infusiones de jamaica utilizando una sonda sonicadora.

Tabla 3. Valores de L* a* b* obtenidos en bebida 1 y 2, junto a una imagen del color dado por una calculadora CIELAB online

Color				
	L*	a*	b*	Imagen
Bebida 1	10.4 ± 0.452	41.9 ± 0.664	17.7 ± 0.763	
Bebida 2	4.11 ± 0.056	26.495 ± 0.289	6.76 ± 0.113	

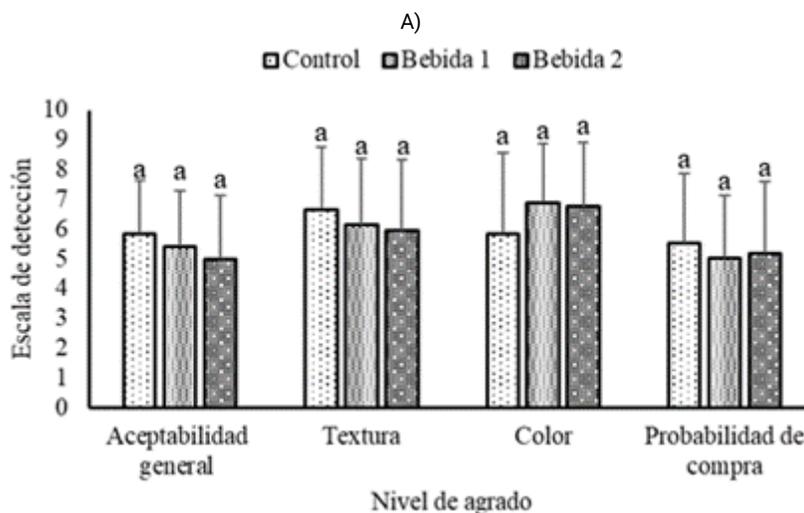
Se muestran los resultados promedio (n=3). ± indica la desviación estándar

Fuente: propia

Análisis sensorial

Como se puede observar en la figura 3(A), el control y las dos bebidas fueron estadísticamente similares en la aceptabilidad general. En la textura, color y probabilidad de compra no hubo diferencia significativa en la comparación de las tres bebidas probadas. Con esto se puede observar que la aceptación de las bebidas 1 y 2 es muy similar a una bebida que ya se encuentra en el mercado. En la figura 3(B) se puede observar que el control fue estadísticamente diferente en todos los parámetros relacionados con la percepción de sabores.

El amargor en una bebida a base de jamaica es indeseable, siendo la bebida control la que presentó una menor percepción. En términos de dulzor, las dos bebidas formuladas obtuvieron una mejor aceptación, al ir dirigido a personas con una menor tolerancia a productos dulces. Por último, la percepción de la acidez fue positiva para las bebidas realizadas en comparación al control, ya que se busca un toque de acidez en bebidas de jamaica naturales.



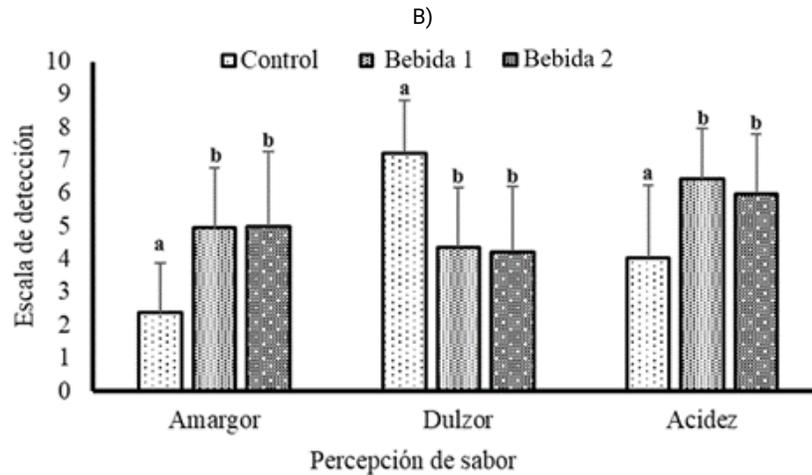


Figura 3. Valores promedio recibidos en el sensorial respecto a los criterios de nivel de agrado (A) y percepción de sabor (B). Valores promedio (n=21) \pm error estándar. Las letras minúsculas diferentes sobre las barras denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$)
Fuente: propia

De acuerdo con los resultados obtenidos de la prueba sensorial, un aspecto para mejorar es la percepción de amargor en comparación con el control. Se podrían explorar opciones como el uso de enmascaradores (Leksrisompong et al., 2012) o la optimización de otros atributos sensoriales mediante un proceso de carbonatación (Sontakke & Verma, 2017).

Cuantificación de proteína

Se realizó la cuantificación de proteína soluble en el hidrolizado de proteína al 1%, y las formulaciones de la bebida 1 y bebida 2 (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de porcentaje de proteína soluble contenida en muestras finales

Muestra	mg eq BSA/g muestra hum	mg eq BSA/g muestra seca	Porcentaje proteína
HPF 1%	626.5	639.3	63.92 \pm 1.94 ^a
Bebida 1	640.1	653.2	65.32 \pm 12.2 ^a
Bebida 2	904.7	923.2	92.32 \pm 0.09 ^b

Valores promedio (n=3) \pm error estándar. Las letras minúsculas diferentes denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Fuente: propia

El contenido proteico de HPF concuerda con estudios previos reportados para hidrolizados de proteína (Nwachukwu & Aluko, 2019; Thamnarathip et al., 2016), con porcentajes muy parecidos entre las dos muestras (63.9% y 65.3%) ya que hay 1% de HPF (tabla 4). En el caso de la bebida 2, el resultado es superior al 90% debido a que existe un mayor contenido de hidrolizado de proteína.

Inhibición de α -amilasa y α -glucosidasa

En la figura 4(A) se puede apreciar el resultado obtenido para α -glucosidasa, mientras que en la figura 4(B) se aprecia el resultado para α -amilasa. Como se puede observar en los porcentajes de inhibición para HPF 1 y 2% en α -glucosidasa, las muestras con mayor inhibición son aquellas que contienen extracto de jamaica, logrando porcentajes de inhibición 80.5, 86.1 y 95.6% para bebida 2, bebida 1, y el extracto diluido de jamaica (Jam 1;2), respectivamente. Esto concuerda con estudios previos en donde se demuestra que extractos de flor de jamaica lograban inhibir hasta 96% de la actividad de la enzima, siempre con una tendencia proporcional a la concentración de extracto (Krishnamurthy et al., 2020; Pai & Shenoy, 2021; Shadhan & Bohari, 2017; Zulfiqar et al., 2022).

Los resultados de inhibición de α -amilasa (figura 4-B) presentaron porcentajes esperados acordes a la literatura, como Acarbosa con 75% (Chelladurai & Chinnachamy, 2018). También los hidrolizados de proteína de frijol coincidieron con lo reportado (Mojica & de Mejía, 2016) cercano al 60%, siendo mayor para HPF 2% como se ha demostrado (a mayor concentración de hidrolizado, mayor inhibición). Respecto la inhibición de las bebidas realizadas, se puede apreciar el efecto sinérgico entre los componentes, ya que la bebida 1 fue una de las muestras que mayor porcentaje de inhibición.

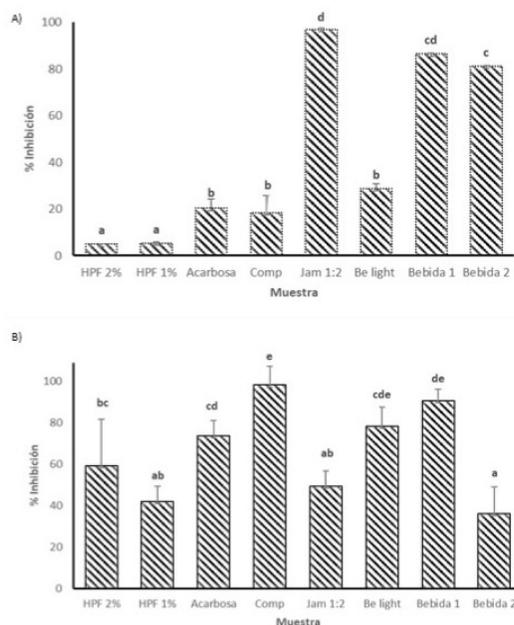


Figura 4. Inhibición de α -glucosidasa (A) y α -amilasa (B) en las formulaciones finales (en conjunto e ingredientes individuales)

Valores promedio (n=3) \pm error estándar. Las letras minúsculas diferentes sobre las barras denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Fuente: propia



Con estos resultados se puede confirmar que las formulaciones mostraron un porcentaje de inhibición a α -glucosidasa y α -amilasa significativo, también se puede comprobar que los componentes principales que ayudan a la inhibición de estas enzimas son HPF, jamaica, hidrocoloides y fibras. Cabe destacar que se vieron mejores resultados de inhibición en las bebidas con 1% de HPF, aunque en futuros trabajos sería oportuno realizar ensayos clínicos para asegurar qué formulación tiene mayores efectos hipoglucémicos, ya que ambas fueron bien recibidas en el análisis sensorial.

Es importante determinar por qué la Acarbosa y HPF no dieron los porcentajes de inhibición esperados en α -glucosidasa. Incluso al combinar las infusiones con HPF (bebida 1 y 2) se obtuvieron porcentajes menores al de Jam 1:2, lo que contrasta con otros trabajos (Zulfiqar et al., 2022), en donde Acarbosa y extractos de jamaica tuvieron efecto sinérgico en la inhibición de la enzima. Otro aspecto para analizar es por qué los hidrocoloides y fibras de manera aislada inhibieron más a α -amilasa que la bebida con todos los componentes, aunque la literatura sí muestra buena inhibición de esta enzima por parte de la pectina, goma de xantana e inulina (Chaturvedi et al., 2021; Fuquene-Munar & Arenas, 2018; Muñoz-Almagro et al., 2021).

Cuantificación de compuestos fenólicos

La concentración de fenoles totales de la bebida 1 y bebida 2, y del extracto de jamaica se muestra en la tabla 5. Se observa que existe una diferencia estadística significativa entre las bebidas formuladas y el extracto diluido de jamaica (Jam 1:2). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Mohd-Esa et al., (2010). El incremento de compuestos fenólicos proporcional al aumento de HPF en las muestras se puede deber a las interacciones sinérgicas (aumento de solubilidad y biodisponibilidad) que se pueden dar entre péptidos bioactivos y fenoles (Pérez-Gregorio et al., 2020).

Tabla 5. Concentración de compuestos fenólicos en nuestras muestras con jamaica

Muestra	[μ g eq ac galico/mL]
Bebida 2	1860 ^c
Bebida 1	1666 ^b
Jam (1:2)	1527 ^a

Valores promedio (n=6) \pm error estándar.

Las letras minúsculas diferentes denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey (p < 0.05).

Fuente: propia

Conclusiones

En el presente trabajo se presentan dos formulaciones con características fisicoquímicas congruentes a lo reportado en la literatura para bebidas a base de infusión de



jamaica. Ambas bebidas obtuvieron una buena aceptación en las pruebas sensoriales sin diferencia significativa en todas las pruebas de aceptabilidad general, además de una buena percepción en cuanto al dulzor y acidez; aunque un aspecto a mejorar es el amargor, abriendo la posibilidad de aplicar un enmascarador o carbonatación a la bebida. Finalmente, se observó un efecto sinérgico de los componentes de la bebida para inhibir enzimas como α -glucosidasa y α -amilasa. Con esto se puede asegurar que se obtuvieron bebidas de aporte nutrimental, con buena aceptación por el consumidor y capaces de producir respuestas hipoglucémicas.

Conflicto de interés

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés

Financiamiento

Fondo de Desarrollo Científico de Jalisco para Atender Retos Sociales (FODECI-JAL 10231-7022)

Referencias

- Barnes, A. S. (2011). The epidemic of obesity and diabetes: trends and treatments. *Texas Heart Institute Journal*, 38(2), 142-144. Recuperado de <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3066828/>
- Chaturvedi, S., Kulshrestha, S., Bhardwaj, K., & Jangir, R. (2021). A review on properties and applications of xanthan gum. En A. Vaishnav & D. Kumar Choudhary (eds.), *Microbial Polymers: Applications and Ecological Perspectives* (pp. 87-107). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0045-6>
- Chelladurai, G. R. M. & Chinnachamy, C. (2018). Alpha amylase and Alpha glucosidase inhibitory effects of aqueous stem extract of *Salacia oblonga* and its GC-MS analysis. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 54(1), e17151. <https://doi.org/10.1590/s2175-97902018000117151>
- Contreras-Lozano, K. P., Ciro-Velásquez, H. J., & Arango-Tobón, J. C. (2019). Hidrocoloides como estabilizantes en bebidas de maíz dulce (*Zea mays* var. *saccharata*) y gel de aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller). *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 22(2), e1090. <http://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1090>
- Fuquene-Munar, J. P., & Arenas Portilla, N. (2018). *Desarrollo de una bebida fermentada y saborizada a base de soya con adición de inulina y de cultivos probióticos* [Tesis de grado, Universidad de La Salle]. Repositorio institucional Unisalle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/179



- Garzón, A. G., Pontoni, S. M., Mamone, G., Drago, S. R., & Cian, R. E. (2024). Xanthan gum and pectin as beverage stabilizers reduce the digestive enzyme hydrolysis of antioxidant and antihypertensive peptides obtained from a brewery byproduct. *Food research international (Ottawa, Ont.)*, 177, 113836. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113836>
- Goudarzi, M., Madadlou, A., Mousavi, M. E., & Emam-Djomeh, Z. (2015). Formulation of apple juice beverages containing whey protein isolate or whey protein hydrolysate based on sensory and physicochemical analysis. *International Journal of Dairy Technology*, 68(1), 70-78. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12155>
- Goyal, R., Singhal, M., & Jialal, I. (2023). *Type 2 diabetes*. StatPearls [Internet]. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK513253/>.
- Inca, K. N. (2024). *Elaboración de una bebida funcional hipocalórica con colágeno hidrolizado* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio institucional UNACH. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12526>
- Krishnamurthy, Z., Khan, N. A., Ali, I. M., Dayoob M., & Hussein, S. (2020). Hibiscus sabdariffa extract as anti-aging supplement through its antioxidant and anti-obesity activities. *Biomedical Research and Therapy*, 7(1), 3572-3578. <https://doi.org/10.15419/bmrat.v7i1.584>
- Lee, J. (2011). *Soy protein hydrolysate; solubility, thermal stability, bioactivity, and sensory acceptability in a tea beverage* [Tesis de grado, University of Minnesota]. Repositorio institucional UM. <https://hdl.handle.net/11299/117047>.
- Leksrisonpong, P., Gerard, P., Lopetcharat, K., & Drake, M. (2012). Bitter taste inhibiting agents for whey protein hydrolysate and whey protein hydrolysate beverages. *Journal of food science*, 77(8), S282–S287. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02800.x>
- Mohd-Esa, N., Hern, F., S., Ismail, A., & Yee, C., L. 2010. Antioxidant activity in different parts of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) extracts and potential exploitation of the seeds. *Food Chemistry*, 122(4), 1055-1060. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.074>
- Mojica, L., & de Mejía, E. G. (2016). Optimization of enzymatic production of anti-diabetic peptides from black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) proteins, their characterization and biological potential. *Food & function*, 7(2), 713–727. <https://doi.org/10.1039/c5fo01204j>
- Mojica, L., de Mejía, E. G., Granados-Silvestre, M. Á., & Menjivar, M. (2017). Evaluation of the hypoglycemic potential of a black bean hydrolyzed protein isolate and its pure peptides using *in silico*, *in vitro* and *in vivo* approaches. *Journal of Functional Foods*, 31, 274-286. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.02.006>



- Mojica, L., Ramos-Lopez, A. S., Sánchez-Velázquez, O. A., Gómez-Ojeda, A., & Luevano-Contreras, C. (2024). Black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein hydrolysates reduce acute postprandial glucose levels in adults with prediabetes and normal glucose tolerance. *Journal of Functional Foods*, 112, 105927. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105927>
- Muñoz-Almagro, N., Montilla, A., & Villamiel, M. (2021). Role of pectin in the current trends towards low-glycaemic food consumption. *Food research international (Ottawa, Ont.)*, 140, 109851. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109851>
- Nwachukwu, I. D. & Aluko, R. E. (2019). A systematic evaluation of various methods for quantifying food protein hydrolysate peptides. *Food Chemistry*, 270, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.054>
- Pai, A. & Shenoy, C. (2021). *In-vitro* antidiabetic activity of methanolic extract of leaves and fruits of *Pouteria campechiana* (Kunth) Baehni. *Biomedicine*, 41(4), 756–762. <https://doi.org/10.51248/.v41i4.732>
- Paquet, É., Hussain, R., Bazinet, L., Makhlof, J., Lemieux, S., & Turgeon, S. L. (2014). Effect of processing treatments and storage conditions on stability of fruit juice based beverages enriched with dietary fibers alone and in mixture with xanthan gum. *LWT - Food Science and Technology*, 55(1), 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.08.014>
- Pérez-Gregorio, R., Soares, S., Mateus, N., & de Freitas, V. (2020). Bioactive peptides and dietary polyphenols: Two sides of the same coin. *Molecules*, 25(15), 3443. <https://doi.org/10.3390/molecules25153443>
- Qian, Y.-F., Yu, J.-Y., Xie, J. & Yang, S.-P. (2023). A mini-review on cold-adapted enzymes from psychrotrophic microorganisms in foods: benefits and challenges. *Current Research in Biotechnology*, 6, 100162. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2023.100162>
- Quiroz, R., Rosas, J., & Aldapa, C. (2022). Producción, composición y usos de la jamaica. *Revista Universitarios Potosinos*, 263, 20-25. <https://leka.uaslp.mx/index.php/universitarios-potosinos/article/view/153>
- Shadhan, R. & Bohari, S. (2017). Effects of *Hibiscus sabdariffa* Linn. fruit extracts on α -glucosidase enzyme, glucose diffusion and wound healing activities. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 7(5), 66–472. <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.01.023>
- Shen, C. H. (2023). *Diagnostic Molecular Biology*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01054-6>
- Shivashankar, M., & Mani, D. (2011). A brief overview of diabetes. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3(4), 22-27. https://www.researchgate.net/publication/288113890_A_brief_overview_of_diabetes



- Sontakke, N. D. S. S., & Verma, S. (2017). Study on Effect of Carbonation on the Properties of Fruit Juices. *International Journal Of Current Microbiology And Applied Sciences*, 6(4), 2426-2432. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.283>
- Thamnarathip, P., Jangchud, K., Nitisinprasert, S. & Vardhanabhuti, B. (2016). Identification of peptide molecular weight from rice bran protein hydrolysate with high antioxidant activity. *Journal of Cereal Science*, 69, 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.04.011>
- Torres, N., Gélvez, V., & Ayala, M. (2019). Elaboración de una bebida de flor de jamaica con pretratamiento de sonicación (*Hibiscus sabdariffa*) endulzada con estevia (*Stevia rebaudiana* B.) y enriquecida con aloe vera. *Revista Infométrica serie Ingeniería, Básicas y Agrícolas*, 1(1), 13-21.
- Tuomi T. (2005). Type 1 and type 2 diabetes: what do they have in common? *Diabetes*, 54(Suppl 2), S40–S45. https://doi.org/10.2337/diabetes.54.suppl_2.s40
- Valencia-Sandoval, K., Rojas-Rojas, M. M., Alvarado-Lagunas, E., & Duana-Avila, D. (2020). Innovación agroindustrial del agave (*Agave tequilana* Weber var. azul): valoración financiera para la obtención de inulina. *Agro Productividad*, 13(3). <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1632>
- Zulficar, S., Marshall, L. J., & Boesch, C. (2022). *Hibiscus sabdariffa* inhibits α -glucosidase activity *in vitro* and lowers postprandial blood glucose response in humans. *Human Nutrition & Metabolism*, 30, 200164. <https://doi.org/10.1016/j.hnm.2022.200164>



ALIMENTACIÓN, SALUD Y MEDIO AMBIENTE





En búsqueda de una dieta saludable: los patrones de alimentación y su impacto en la población

Elda Cristina Villaseñor-Tapia¹, Edgar Rubén Mendieta-Condado² y Ana Laura Márquez-Aguirre^{1*}

¹Unidad de Biotecnología Médica Farmacéutica, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C., México.

²Laboratorio Estatal de Salud Pública del Estado de Jalisco, O.P.D. Servicios de Salud Jalisco, México

*Autor de correspondencia: amarquez@ciatej.mx

Palabras clave:

alimentos ultraprocesados, dieta, enfermedades no transmisibles, patrones alimentarios, salud.

Resumen

El patrón de alimentación poco saludable representa un gran desafío en salud pública. El consumo excesivo de alimentos ultraprocesados -ricos en grasas, carbohidratos y aditivos-, así como un estilo de vida sedentario, se ha asociado al desarrollo de diversas enfermedades crónicas como la obesidad y la diabetes, las cuales aumentan el riesgo de enfermedades cardiovasculares. Combatir los efectos negativos requiere un esfuerzo coordinado para promover hábitos alimentarios más saludables y crear un entorno que facilite mejores elecciones alimenticias. Existen patrones de alimentación que contribuyen a reducir factores de riesgo de enfermedades no transmisibles y algunas causas de mortalidad, denominados “patrones alimentarios saludables”. La elección de los alimentos a consumir es determinante de la salud humana, por lo que esta revisión pretende dar un panorama del patrón de alimentación poco saludable con énfasis en los alimentos ultraprocesados y sus efectos negativos en la salud, así como un contexto general de algunas dietas que muestran evidencias en la reducción de factores de riesgo para diversas enfermedades. Nuestra finalidad es promover en el lector hábitos alimentarios más saludables que puedan llevarlo a cambios que mejoren su salud y bienestar.

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) define una dieta saludable como aquella que promueve el crecimiento y el desarrollo al mismo tiempo que previene la malnutrición. Estas dietas están pensadas para promover un buen crecimiento, prevenir la desnutrición, reducir

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 65-82.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14706985>

Recibido: 04 octubre 2024
Revisado: 11 de noviembre 2024
Aceptado: 12 de diciembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



el riesgo de enfermedades crónicas relacionadas con la dieta y apoyar la preservación del medio ambiente (FAO and WHO 2019, Vincent, 2020).

Actualmente, el término “malnutrición” ya no solamente se refiere a la desnutrición, sino que incluye tanto la obesidad como a los factores alimentarios que aumentan el riesgo de Enfermedades no transmisibles (ENT). La pandemia de obesidad ha resaltado la necesidad urgente de promover hábitos alimentarios saludables, ya que mantener una dieta equilibrada y sostenible es clave para el bienestar físico, mental y social a lo largo de la vida (Fanzo et al., 2020).

No obstante, buscar una dieta saludable presenta diversos desafíos. Los patrones de alimentación poco saludables, como el consumo excesivo de alimentos procesados y ricos en calorías -pero pobres en nutrientes- aumentan el riesgo de ENT como las enfermedades cardiovasculares, cáncer y diabetes (Neuhouser, 2019; Saura et al., 2020). Superar los hábitos poco saludables y fomentar opciones alimentarias nutritivas y sostenibles requiere un enfoque integral que combine educación sobre nutrición, cambios de comportamiento y un entorno de apoyo (Shang et al., 2023).

Desarrollo

Patrón de alimentación actual: mayormente poco saludable

La palabra “dieta” frecuentemente es utilizada de manera errónea para referirse a una restricción calórica para conseguir una pérdida de peso. Sin embargo, la dieta se define como la suma de los alimentos que ingerimos durante el día; y cuando seguimos esta dieta de manera regular en cuanto a la composición, frecuencia y cantidad de alimentos y bebidas, se denomina patrón de alimentación. Por lo tanto, el “patrón alimentario” puede definirse como las cantidades, proporciones, variedades o combinaciones de diferentes alimentos, bebidas y nutrientes (cuando estén disponibles) presentes en la dieta, y la frecuencia con la que son consumibles habitualmente, siendo característicos de una región y cultura. Estos patrones se ven influidos por factores como el estilo de vida, la disponibilidad de alimentos, el ingreso económico, las actividades y los valores sociales. Dichos patrones pueden ser saludables o no, afectando el estado nutricional tanto del individuo como de la población (Branca et al., 2019).

La evolución de los sistemas alimentarios ha priorizado la eficiencia y la producción en masa, lo que ha facilitado la disponibilidad de alimentos baratos, principalmente derivados de cultivos de cereales básicos. Aunque este cambio ha sido clave para reducir el hambre en muchas partes del mundo, también ha provocado una disminución significativa en la diversidad alimentaria. Las dietas locales y nutritivas han sido reemplazadas en gran parte por opciones más accesibles, pero menos salu-

dables. Este fenómeno ha contribuido a un mayor consumo de productos procesados y ultraprocesados que, aunque fáciles de obtener, carecen de los nutrientes esenciales que solían caracterizar las dietas tradicionales (Zhang & Giovannucci, 2023).

El patrón de alimentación no saludable caracterizado por el consumo de alimentos con alto contenido de grasas, bebidas con alto contenido de azúcar y alimentos ultraprocesados, acompañados de un estilo de vida sedentaria, ha derivado en un número creciente de problemas de salud pública. La modernización y los cambios en los estilos de vida reducen el tiempo dedicado a la actividad física y a la preparación de comidas saludables. Los alimentos poco saludables y altamente calóricos son accesibles y preferidos por conveniencia. Este ambiente incrementa el riesgo de que la población adopte hábitos alimentarios perjudiciales para su salud y bienestar promoviendo el sobrepeso u obesidad en los individuos y en las poblaciones (entorno obesogénico) (Kussmann et al., 2023). Ante este panorama, es esencial que además de ofrecer información clara y accesible sobre las características de los alimentos que pueden generar riesgos para la salud, se fomente dietas centradas en la prevención y el tratamiento de estas afecciones. La promoción de una correcta selección de alimentos es clave para revertir esta tendencia (Vaamonde & Álvarez-Món, 2020) (Figura 1).

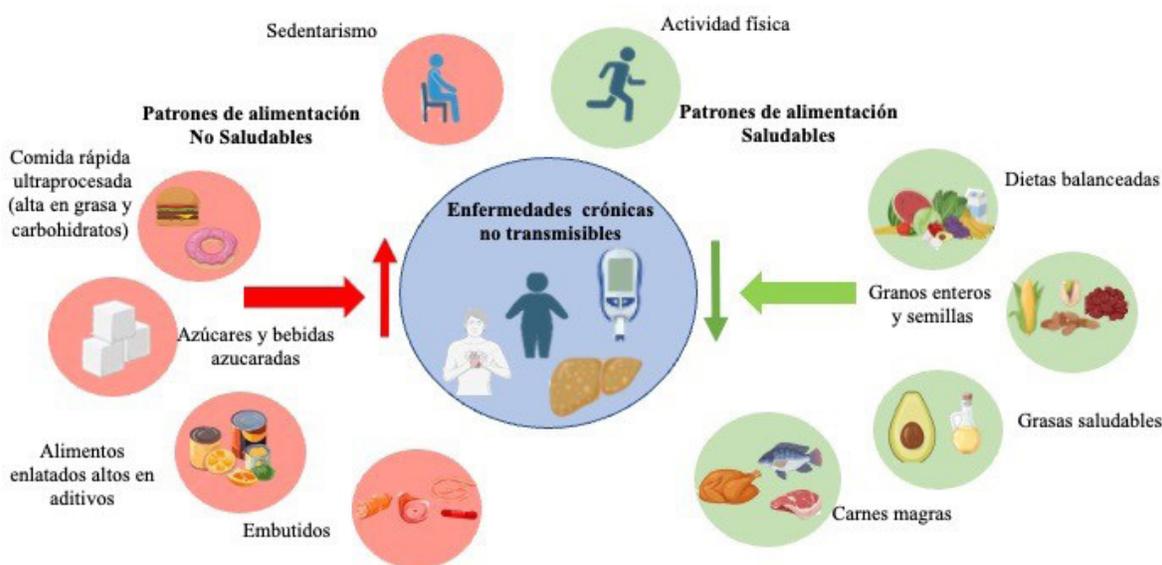


Figura 1. Patrón de alimentación no saludable y su impacto en la salud. La ingesta excesiva de alimentos ultraprocesados con un alto contenido de calorías vacías y bajo aporte de nutrientes esenciales se asocia con un mayor riesgo de diversas enfermedades crónicas como la obesidad, diabetes, hígado graso o enfermedades cardiovasculares. Adoptar una dieta saludable con un enfoque integral, que incluya alimentos ricos en nutrientes como grasas insaturadas, cereales integrales, proteínas de alta calidad, frutas y verduras, así como actividad física, tiene beneficios significativos para reducir el riesgo de estas enfermedades

Fuente: Imagen creada con bioRender



Alimentos ultraprocesados: un exceso de calorías y aditivos

El consumo de alimentos ultraprocesados, como refrescos, botanas empaquetadas y comidas rápidas, es común debido a su atractivo sabor, conveniencia y precio accesible, especialmente en países de ingresos medios y altos. Estos alimentos, que pueden representar más del 50% de la ingesta diaria de energía, son ricos en carbohidratos y grasas, lo que los hace sensorialmente agradables y fomenta su consumo. Sin embargo, su ingesta excesiva se asocia con un mayor riesgo de obesidad y enfermedades metabólicas debido a su alto contenido de calorías vacías y bajo aporte de nutrientes esenciales. (Adams et al., 2020; Zhang & Giovannucci, 2023). A continuación, se describen las características de este tipo de productos y sus potenciales riesgos para la salud.

Alimentos con alto contenido en carbohidratos: los carbohidratos presentes en los alimentos se dividen en simples y complejos. Los simples proporcionan energía rápida, mientras que los complejos, al estar formados por cadenas largas de moléculas de azúcar, se digieren más lentamente, lo que ayuda a mantener estables los niveles de energía y glucosa en sangre. Los carbohidratos por sí solos no son perjudiciales, pero su impacto depende de la fuente alimentaria. Los carbohidratos ricos en nutrientes, como los de cereales integrales, frutas y verduras, son esenciales para una dieta saludable. Muchos carbohidratos complejos contienen fibra, beneficiosa para la salud digestiva. En cambio, los carbohidratos presentes en alimentos ultra procesados, como bebidas y refrigerios azucarados, pueden contribuir a problemas de salud como la obesidad, enfermedades cardiovasculares, diabetes, hígado graso y trastornos como la depresión y ansiedad, cuando se consumen en exceso (Comerford et al., 2021).

Alimentos con alto contenido en grasas: las grasas saturadas, presentes en alimentos de origen animal y algunos aceites vegetales, como carnes rojas, lácteos, aceites de coco y palma, son sólidas a temperatura ambiente. El consumo excesivo de estas grasas está relacionado con problemas cardiovasculares debido al aumento y acumulación del colesterol “malo” (LDL), lo que incrementa el riesgo de enfermedades cardíacas, ataques al corazón y accidentes cerebrovasculares, además de contribuir al aumento de peso y las ENT (Heilesen, 2020).

Las *grasas trans* —comunes en alimentos ultra procesados como margarinas y frituras—, se generan durante la hidrogenación parcial de aceites vegetales. Su consumo se ha asociado con mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares y diabetes tipo 2 (Oteng & Kersten, 2020)

Los *aceites parcialmente hidrogenados* de las margarinas y mantecas vegetales y aceites refinados, como los de soya, maíz y canola, usados en productos procesados,



también representan riesgos para la salud. Estos aceites pueden perder nutrientes durante su procesamiento, generar radicales libres y desequilibrar la proporción de grasas omega-6 y omega-3, promoviendo inflamación y riesgo de enfermedades cardíacas (Zhang et al., 2021).

Por consiguiente, se recomienda sustituir el consumo de estas grasas por grasas insaturadas, presentes en alimentos como aceite de oliva, aguacates, nueces y pescado, para reducir estos riesgos.

Aditivos en los alimentos ultraprocesados

El *glutamato monosódico* es un aditivo utilizado ampliamente para potenciar el sabor umami en alimentos procesados. Sin embargo, su consumo ha generado controversias, ya que algunos estudios sugieren que puede causar efectos adversos como migrañas, asma y el llamado “Síndrome del restaurante chino” el cual se caracteriza por presentar diversos síntomas que pueden incluir dolor de cabeza, enrojecimiento, sudoración, sensación de presión facial, náuseas o debilidad. A pesar de estos informes, se necesitan más investigaciones para determinar los verdaderos impactos del glutamato en la salud, tanto a corto como a largo plazo. Es importante señalar que el ácido glutámico es un neurotransmisor que pasa con facilidad la barrera hematoencefálica; por tanto, las implicaciones del glutamato monosódico en la dieta pueden ser mayores (Bawaskar et al., 2017; Mortensen et al., 2017).

Los *colorantes químicos* también se emplean en la industria alimentaria para hacer los productos más atractivos visualmente, lo que aumenta su preferencia entre los consumidores. No obstante, algunos, como el rojo 40 y el amarillo 5, han sido asociados con problemas de salud, incluyendo hiperactividad en niños, reacciones alérgicas y posibles efectos cancerígenos, lo que ha llevado a su prohibición en ciertos países (Li et al., 2022; Sen et al., 2019).

Los *nitritos* son aditivos comunes en productos como embutidos y aderezos, utilizados para conservar los alimentos y mejorar su sabor y color. Sin embargo, su exposición excesiva puede causar metahemoglobinemia, una condición que afecta la capacidad de la hemoglobina para transportar oxígeno. Además, los nitritos pueden formar N-nitrosaminas, compuestos cancerígenos vinculados a enfermedades como el cáncer y problemas cardiovasculares (Chazelas et al., 2022; Srouf et al., 2022).

Los *edulcorantes sintéticos*, como el aspartame y la sucralosa, se presentan como alternativas al azúcar y son populares en productos dietéticos. Aunque se promueven como una forma de reducir la ingesta calórica, existen preocupaciones sobre sus efectos en la salud. Diversos estudios los han asociado con un mayor riesgo de obesidad, diabetes tipo 2, incluso cáncer (Debras et al., 2022).



El *jarabe de maíz con alto contenido de fructosa* se ha convertido en un ingrediente clave en diversos alimentos procesados, especialmente en dulces y bebidas azucaradas. Su consumo ha aumentado significativamente en las últimas décadas, particularmente entre niños y adolescentes. Este incremento en la ingesta de fructosa ha sido relacionado con el aumento de la obesidad, la diabetes tipo 2 y la enfermedad del hígado graso no alcohólico (Jung et al., 2022; Khorshidian et al., 2021).

En conclusión, aunque los aditivos alimentarios pueden mejorar el sabor, apariencia o duración de los alimentos, todos ellos han sido asociados a diversos riesgos para la salud, lo que subraya la importancia de una dieta equilibrada y el consumo moderado de alimentos procesados.

Las dietas saludables: no solo son verduras y frutas

La definición de una dieta saludable ha evolucionado para incluir un enfoque que incluye alimentos ricos en nutrientes, basados en alimentación integral: como el consumo de grasas insaturadas, más cereales integrales, más proteínas de alta calidad, complementando con frutas y verduras, con lo cual se logra el aporte de micronutrientes, oligoelementos y fibra, implementando así un esquema de alimentación óptimo. Los estudios epidemiológicos destacan que los alimentos frescos y poco procesados se asocian con mejores resultados de salud (Cena & Calder, 2020; Gibbs & Cappuccio, 2022; Martini et al., 2023).

Las dietas saludables son aquellas que integran todos los macronutrientes esenciales (carbohidratos, grasas y proteínas) en las cantidades adecuadas dependiendo el individuo y sus necesidades, con el objetivo de prevenir y/o tratar enfermedades, los cuales deben ser guiados por profesionales de la salud. Actualmente las recomendaciones de la OMS para una dieta saludable incluyen un enfoque integral, en el que llevar una dieta sana a lo largo de la vida ayuda a prevenir la malnutrición en todas sus formas, así como de las diferentes ENT. La composición exacta de una alimentación variada, equilibrada y saludable estará determinada por las características de cada persona (edad, sexo, hábitos de vida y grado de actividad física), el contexto cultural, los alimentos disponibles en el lugar y los hábitos alimentarios. No obstante, los principios básicos de la alimentación saludable siguen siendo los mismos (Figura 2).

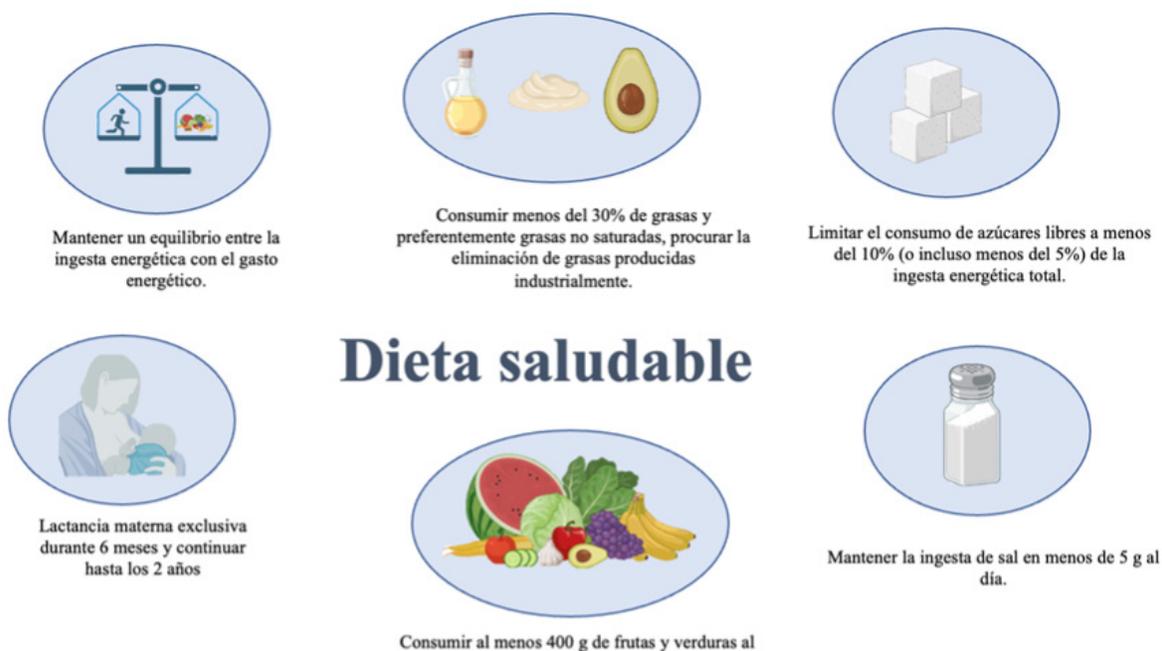


Figura 2. Recomendaciones de una dieta saludable. Las recomendaciones actuales de la OMS para una dieta saludable con un enfoque integral, incluye alimentos ricos en nutrientes como grasas insaturadas, cereales integrales, proteínas de alta calidad, frutas y verduras, así como actividad física, los cuales muestran tener beneficios significativos para reducir el riesgo enfermedades relacionadas a la alimentación. Información disponible en: FAO and WHO. 2019. Sustainable healthy diets – Guiding principles. Rome.

Fuente: Imagen creada con bioRender

Adoptar una dieta saludable basada en alimentos integrales tiene beneficios significativos para la salud pública e individual. Sin embargo, se sabe que la alimentación evoluciona con el tiempo, y en ella influyen muchos factores socioeconómicos que interactúan de manera compleja y determinan modelos dietarios personales. En la actualidad se han popularizado diversas dietas que pueden ayudar a mejorar la salud. Las dietas paleolítica, vegetariana, macrobiótica, mediterránea, cetogénica, entre otras han mostrado evidencia de sus efectos no solo en la reducción de peso, sino también en la prevención de algunas ENT (Tabla 1).

Sin embargo, es importante mencionar que algunas de estas dietas suelen ser altamente *restrictivas* ya que se caracterizan por la eliminación o limitación severa de grupos de alimentos específicos o macronutrientes, por lo que se pueden presentar como consecuencia algunos problemas de salud cuando se realizan sin supervisión médica (Lennerz et al., 2021). A continuación se describen algunas de ellas:

La *dieta paleolítica* se ha popularizado en los últimos años, enfatizando el consumo de alimentos integrales y no procesados que supuestamente consumían nuestros ancestros cazadores-recolectores durante la era Paleolítica. Los principales beneficios de esta dieta incluyen regular el apetito, facilitar la pérdida de peso, reducir la inflamación y disminuir los niveles de azúcar en sangre. Sin embargo, se ha cuestionado



la validez de este enfoque, ya que las dietas de nuestros antepasados probablemente variaron significativamente según la ubicación geográfica y los recursos disponibles. Las interpretaciones actuales pueden no reflejar con precisión sus patrones dietéticos actuales (Bisai et al., 2023).

Las *dietas vegetarianas* han adquirido notoriedad por sus beneficios en el control del peso, la salud cardiovascular y la sostenibilidad. Existen diferentes tipos, como la lacto-ovo-vegetariana (que incluye lácteos y huevos), la ovo-vegetariana (solo huevos), la lacto-vegetariana (solo lácteos), el vegetarianismo estricto (sin alimentos de origen animal) y el veganismo (sin productos animales en general). Aunque estas dietas pueden ofrecer nutrientes esenciales, requieren planificación para asegurar una adecuada ingesta de nutrientes como vitamina B12, hierro y ácidos grasos omega-3 (Bogataj Jontez et al., 2023).

Las *dietas macrobióticas* buscan equilibrar las energías Yin y Yang, integrando alimentación, medicina y espiritualidad. Se caracterizan por el uso de ingredientes orgánicos y locales, limitando grasas, azúcares y alimentos procesados, y enfatizando cereales integrales, legumbres y verduras. Aceptan semillas, frutos secos, algas y pescado, prefiriendo frutas locales y de temporada y evitando aceites refinados. Existen versiones más estrictas que eliminan todos los productos animales y otras más flexibles. Aunque se ha asociado con mejoras en la salud cardiovascular, su sostenibilidad a largo plazo y posibles deficiencias nutricionales necesitan más investigación (Gobbetti et al., 2018; Rostami et al., 2017).

El *ayuno intermitente o alimentación restringida* ha cobrado relevancia como estrategia dietética para mejorar la salud metabólica, alternando períodos de ayuno y alimentación. No es una dieta completa, sino que se combina con la restricción calórica para la pérdida de peso. Incluye métodos como el ayuno en días alternos, el enfoque 5:2 (comer normalmente 5 días y ayunar 2) y la restricción del tiempo de alimentación a 8 horas diarias. Se recomienda mantener una buena hidratación, dormir al menos 8 horas y optar por alimentos ricos en nutrientes durante las ventanas de alimentación (Patterson & Sears, 2017).

Los enfoques dietéticos equilibrados que combinan una variedad de alimentos de origen vegetal y animal son respaldados por la investigación. Entre ellos se encuentran la dieta mediterránea, rica en frutas, verduras, cereales integrales, legumbres, nueces y aceite de oliva, y la dieta DASH, que enfatiza el consumo de frutas, verduras y lácteos bajos en grasa (Xiao et al., 2024).

La *dieta DASH* (Dietary Approaches to Stop Hypertension) ha ganado atención en nutrición y salud pública por sus beneficios, como la reducción del riesgo de enfermedades cardiovasculares. Esta dieta se enfoca en el consumo de frutas,



verduras, cereales integrales y productos lácteos bajos en grasa, limitando grasas saturadas, carnes rojas y azúcares agregados. También se ha relacionado con un menor riesgo de diabetes tipo 2 y cáncer colorrectal gracias a su contenido en fibra y antioxidantes (Filippou et al., 2020).

La *dieta mediterránea* es un patrón alimenticio inspirado en los hábitos tradicionales de los países del Mediterráneo, como España, Italia y Grecia. Se basa en el consumo predominante de alimentos frescos y mínimamente procesados y con alto contenido en antioxidantes, fibra y grasas saludables, donde su principal aporte esta dado por frutas y verduras, cereales y semillas, pescados y mariscos, y grasas de origen vegetal. Se ha relacionado su consumo a la baja prevalencia de enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo 2 y algunos tipos de cáncer (Estruch et al., 2018).

Por otro lado, la *dieta FODMAP* (fermentables, oligosacáridos, disacáridos, monosacáridos y polioles) está diseñada para ayudar a personas con problemas digestivos, como el síndrome del intestino irritable. Consiste en tres fases: eliminación (suprimir alimentos altos en FODMAP por 4-6 semanas), reintroducción (agregar lentamente alimentos para identificar intolerancias) y personalización (elaborar un plan que limite solo los FODMAP problemáticos). Los alimentos altos en FODMAP incluyen ciertas frutas, verduras, cereales, legumbres, productos lácteos y edulcorantes (Bellini et al., 2020; Haller et al., 2021).

Las *dietas cetogénicas* son bajas en carbohidratos y altas en grasas, diseñadas originalmente para tratar afecciones médicas, especialmente la epilepsia refractaria en niños. Inducen un estado de cetosis, donde el cuerpo metaboliza grasa en lugar de carbohidratos. Además de la epilepsia, se investiga su uso en enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer y Parkinson, así como en trastornos psiquiátricos debido a sus efectos beneficiosos sobre la función cerebral y la regulación de neurotransmisores. Estas dietas suelen contener menos del 5-10% de carbohidratos, 70-80% de grasas saludables y 10-20% de proteínas. Ejemplos incluyen la dieta carnívora, que elimina alimentos vegetales. Aunque pueden mejorar marcadores metabólicos y facilitar la pérdida de peso, presentan riesgos, como preocupaciones sobre su sostenibilidad a largo plazo y efectos negativos en la salud. Se necesita más investigación sobre sus efectos a largo plazo para comprender mejor sus riesgos y beneficios (Ludwig, 2020; O'Hearn, 2020).

Las *dietas sin gluten* han incrementado sus seguidores, especialmente entre quienes padecen enfermedad celíaca, sensibilidad al gluten o alergia al trigo, aunque muchas personas sin estas condiciones las adoptan como estilo de vida. Estas dietas excluyen el gluten, una proteína presente en el trigo, la cebada y el centeno. Se enfocan en alimentos no procesados y requieren una revisión cuidadosa de las etiquetas para



evitar la contaminación por gluten en productos procesados. Aunque son esenciales para quienes tienen intolerancia al gluten, es importante mantener un equilibrio nutricional para evitar deficiencias al eliminar grupos de alimentos (Dennis et al., 2019).

Las *dietas modificadas en carbohidratos para diabetes* se centran en controlar la hiperglicemia en sangre en personas con diabetes. Existen varios enfoques: 1) Dietas bajas en carbohidratos: limitan el consumo de carbohidratos y permiten carnes, pescado, huevos, verduras, frutos secos y grasas saludables. 2) Dietas moderadas en carbohidratos: permiten entre 130 y 225 gramos de carbohidratos diarios, incluyendo cereales integrales, frutas, verduras y legumbres, siendo más flexibles y fáciles de seguir a largo plazo. 3) Dietas de bajo índice glucémico: se enfocan en carbohidratos con bajo índice glucémico, promoviendo frutas, verduras, legumbres y cereales integrales. El enfoque general incluye reemplazar azúcares simples por carbohidratos complejos, priorizar alimentos ricos en fibra, asegurar una ingesta adecuada de proteínas y consumir grasas saludables (Aloke et al., 2022; Dashti et al., 2021).



Tabla 1. Ejemplos de dietas con efectos sobre la salud

Nombre	Porcentaje de macronutrientes	Alimentos prohibidos	Alimentos permitidos	Efectos	Complicaciones	Referencias
Paleolítica	~30% de carbohidratos ~40% de grasas ~30% de proteínas	Granos y cereales: trigo, maíz, arroz, avena, cebada y derivados. Legumbres: frijoles, lentejas, soya. Lácteos: leche, yogurt, quesos y otros derivados. Azúcares refinados: azúcares de mesa, mieles, etc. Alimentos procesados: comidas empaquetadas, embutidos, botanas y bebidas azucaradas.	Proteínas: carnes de todo tipo preferiblemente de libre pastoreo Huevos y pescados Frutas y verduras: Todas las verduras de preferencia orgánicas Frutas secas y semillas: almendras, nueces, semillas de chía y de girasol Grasas derivadas de frutos sin refinar Raíces y tubérculos Especias y hierbas	Control de peso Mejora la salud digestiva Reduce la inflamación Estabiliza los niveles de glucosa en sangre	Baja sostenibilidad a largo plazo. Restricciones dietéticas por la exclusión de grupos de alimentos	(Bisai et al., 2023; Genoni et al., 2019)
Vegetariana	~50-55% de carbohidratos ~30% de grasas ~13-15% de proteínas	Carne y productos cárnicos Pescados y mariscos Gelatinas Grasas animales Caldos	Legumbres. Frutas y verduras de todo tipo. Cereales de todo tipo. Frutos secos y semillas. Productos lácteos (lacto-vegetarianos) Huevos (ovo-vegetarianos) Grasas saludables de origen vegetal. Sustituto de carne	Mejora la salud cardiovascular Control de peso Beneficios para la salud digestiva Reducción del riesgo de algunos tipos de cáncer	Deficiencias nutricionales Dificultad de obtener proteínas de alto valor biológico Posible exceso en el consumo de carbohidratos	(Agnoli et al., 2023; Bogataj Jontez et al., 2023; García-Maldonado et al., 2019)
Macrobiótica	~50-60% de carbohidratos ~20-30% de grasas ~10-15% de proteínas	Carnes rojas y procesadas Productos lácteos Azúcares refinados Frutas tropicales o muy dulces Alimentos procesados y refinados como pan blanco, pastas refinadas Harinas refinadas Café y estimulantes Alimentos con conservantes y aditivos químicos	Cereales integrales Vegetales Legumbres Algas Frutas locales y de temporada. Frutos secos y semillas Pescado blanco Bebidas de hierbas Condimentos naturales	Alimentos natural y equilibrada Fomenta el control de peso Beneficios digestivos Reducción del riesgo de enfermedades crónicas	Riesgo de deficiencias nutricionales Rigidez alimentaria Baja ingesta de proteínas Pérdida de peso excesiva Difícil de mantener	(Rostami et al., 2017)
Ayuno Intermitente	Adaptables. ~45-55% de carbohidratos ~20-30% de grasas ~15-25% de proteínas	Azúcares refinados Alimentos ultraprocesados Grasas saturadas y trans Bebidas hipercalóricas	Proteínas magras. Carbohidratos complejos Grasas saludables Verduras y frutas frescas Bebidas sin azúcares	Pérdida de peso. Mejora la sensibilidad a la insulina. Mejora la salud cardiovascular	Hambre y fatiga. Posible pérdida de masa muscular. Dificultad para mantener el rendimiento físico. Atracones en ventanas de alimentación.	(Patterson & Sears, 2017; Xiao et al., 2024)
DASH	~55-60% de carbohidratos ~27-30% de grasas ~20% de proteínas	Sal o alimentos altos en sodio. Grasas saturadas y trans. Azúcares refinados Carnes rojas y procesadas. Alcohol	Frutas y verduras Cereales integrales Lácteos bajos en grasa Proteínas magras Legumbres, nueces y semillas. Grasas saludables. Bebidas no azucaradas	Reducción de la presión arterial. Mejora la salud cardiovascular. Pérdida de peso.	Dificultad en la reducción de sodio.	(Filippou et al., 2020)



Mediterránea	~45-55% de carbohidratos ~30-40% de grasas ~15-20% de proteínas	Alimentos ultraprocesados Grasas trans Azúcar refinada Carnes rojas en exceso Bebidas azucaradas	Frutas, verduras Legumbres y frutos secos Cereales integrales Aceite de oliva Pescados y mariscos moderadas cantidades de productos lácteos Vino tinto	Costos elevados de ingredientes y alimentos Dificultad de adaptarse en regiones donde estos alimentos no son accesibles	(Estruch et al., 2018)
FODMAP	~45-60% de carbohidratos ~25-35% de grasas ~15-25% de proteínas	Frutas: manzana, pera, mango, sandía, cerezas y frutas deshidratadas. Verduras: ajo, cebolla, crucíferas. Lácteos ricos en lactosa. Granos con gluten. Legumbres: frijoles, lentejas, garbanzos. Edulcorantes/ Polioles: Sorbitol, maltitol, xilitol, maltitol. Bebidas carbonatadas y azucaradas. Carbohidratos refinados: pan, tortilla, cereales, galletas, pastas, etc. Azúcares: azúcar de mesa, mieles, jarabes, etc. Legumbres: frijoles, lentejas, etc. Lácteos Frutas con alto contenido en azúcares: plátano, manzana, piña, uvas, etc. Bebidas azucaradas	Frutas: plátano maduro, arándanos, kiwis, naranjas, piña, uvas y mandarinas. Verduras: espinaca, zanahoria, pepino, calabacín, pimientos, berenjena y calabaza. Granos: arroz, avena, quinoa, maíz, y productos sin gluten Carnes todas sin procesar o marinar. Lácteos sin lactosa. Frutos secos limitados.	Restrictiva y compleja. Posible deficiencia nutricional.	(Haller et al., 2021)
Cetogénica	~5-10% de carbohidratos ~70-80% de grasas ~20-25% de proteínas	Carbohidratos refinados: pan, tortilla, cereales, galletas, pastas, etc. Azúcares: azúcar de mesa, mieles, jarabes, etc. Legumbres: frijoles, lentejas, etc. Lácteos Frutas con alto contenido en azúcares: plátano, manzana, piña, uvas, etc. Bebidas azucaradas	Carnes de todo tipo Grasas saludables: aceites, aguacate, nueces y semillas Lácteos enteros: Crema y yogurt griego Verduras bajas en carbohidratos: lechuga, pepinos, acelgas Frutas bajas en carbohidratos: fresas, frambuesas, moras, limón, lima Bebidas sin azúcares	Baja sostenibilidad a largo plazo Cansancio	(Ludwig, 2020; O'Hearn, 2020)
Libre de gluten	~45-65% de carbohidratos ~20-35% de grasas ~10-35% de proteínas	Granos que contienen gluten: trigo, cebada, centeno Alimentos procesados: en su mayoría contienen gluten Productos homeados Pastas y fideos de trigo Cerveza	Frutas y verduras Proteínas: de todo tipo sin procesar, ni marinar Granos y harinas sin gluten: Arroz, maíz, quinoa, mijo, amaranto Lácteos: sin gluten Frutos secos: almendra, nuez, etc. Aceites y grasas Sustitutos de pan y pastas sin gluten	Deficiencia de nutrientes, como vitaminas del complejo B	Dennis et al., 2019
Dietsas modificadas en carbohidratos para diabetes	Variable, dependiendo la restricción. 5-50% de carbohidratos 30-70% de grasas 15-25% de proteínas	Dulces y repostería Carbohidratos refinados: pan blanco, arroz blanco y pasta Alimentos fritos Lácteos enteros Bebidas azucaradas y alcohólicas	Verduras no almidonadas y de hojas verdes Frutas frescas como arándanos, manzanas, fresas. Peras, manzanas Granos enteros: avena, quinoa, arroz integral Proteínas magras Lácteos bajos en grasa Semillas: almendras, nueces, semillas de chia Aceites saludables: Aceites de oliva, aguacate	Controla los niveles de glucosa en sangres No aplica	(Aloke et al., 2022)



Conclusiones

En los países desarrollados y en vías de desarrollo la prevalencia de enfermedades crónicas no transmisibles (ENT) ha ido en aumento debido a la alta disponibilidad de alimentos ultraprocesados que son considerados altamente energéticos, con alto contenido de sal, azúcares, grasas saturadas y trans y con bajo contenido en nutrientes como las vitaminas y minerales. El consumo excesivo de estos alimentos ha cambiado el patrón alimentario en las últimas décadas, ya que se han vuelto más económicos y accesibles. Los alimentos ultraprocesados se destacan por procesos de producción orientados para abaratar costos, más que en conservar la integridad de los nutrientes incluidos en ellos. Esta situación destaca la necesidad urgente de desarrollar estrategias más efectivas para fomentar hábitos alimentarios saludables, como son el acceso a la información de patrones alimenticios saludables, estrategias en su consumo y un aumento en el acceso y la disponibilidad de alimentos nutritivos y sostenibles, lo cual es esencial para reducir el riesgo de enfermedades crónicas y mejorar la salud en la población. Sin embargo, es importante mencionar que cada una de las dietas presentan beneficios y riesgos, por lo que deben ser evaluadas por profesionales de la salud para poder ser ajustadas a las necesidades de los individuos para garantizar los efectos benéficos y preservar la salud de quien las consume, con estrategias enfocadas a la nutrición personalizada.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

Elda Cristina Villaseñor Tapia con CVU 898594 agradece a CONAHCYT por la beca otorgada para su formación del programa de Doctorado en Ciencias en Innovación Biotecnológica.

Referencias

- Adams, J., Hofman, K., Moubarac, J. C., & Thow, A. M. (2020). Public health response to ultra-processed food and drinks. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, *369*, m2391. <https://doi.org/10.1136/BMJ.M2391>
- Agnoli, C., Baroni, L., Bertini, I., Ciappellano, S., Fabbri, A., Goggi, S., Metro, D., Papa, M., Sbarbati, R., Scarino, M. L., Pellegrini, N., & Sieri, S. (2023). A comprehensive review of healthy effects of vegetarian diets. *Nutrition, Me-*



- tabolism, and Cardiovascular Diseases : NMCD*, 33(7), 1308–1315. <https://doi.org/10.1016/J.NUMECD.2023.04.005>
- Aloke, C., Egwu, C. O., Aja, P. M., Obasi, N. A., Chukwu, J., Akumadu, B. O., Ogbu, P. N., & Achilonu, I. (2022). Current Advances in the Management of Diabetes Mellitus. *Biomedicines*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/BIOMEDICINES10102436>
- Bawaskar, H. S., Bawaskar, P. H., & Bawaskar, P. H. (2017). Chinese Restaurant Syndrome. *Indian Journal of Critical Care Medicine : Peer-Reviewed, Official Publication of Indian Society of Critical Care Medicine*, 21(1), 49. <https://doi.org/10.4103/0972-5229.198327>
- Bellini, M., Tonarelli, S., Nagy, A. G., Pancetti, A., Costa, F., Ricchiuti, A., de Bortoli, N., Mosca, M., Marchi, S., & Rossi, A. (2020). Low FODMAP diet: Evidence, doubts, and hopes. *Nutrients*, 12(1), 148. <https://doi.org/10.3390/nu12010148>
- Bisai, S., Dutta, S., & Das Mohapatra, P. K. (2023). Traditional food consumption pattern and nutritional status of Oraons: An Asian Indian indigenous community. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 969264. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2023.969264/BIBTEX>
- Bogataj Jontez, N., Kenig, S., Šik Novak, K., Petelin, A., Jenko Pražnikar, Z., & Mohorko, N. (2023). Habitual low carbohydrate high fat diet compared with omnivorous, vegan, and vegetarian diets. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1106153. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2023.1106153/BIBTEX>
- Branca, F., Lartey, A., Oenema, S., Aguayo, V., Stordalen, G. A., Richardson, R., Arvelo, M., & Afshin, A. (2019). Transforming the food system to fight non-communicable diseases. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 364, 1296. <https://doi.org/10.1136/BMJ.L296>
- Cena, H., & Calder, P. C. (2020). Defining a Healthy Diet: Evidence for the Role of Contemporary Dietary Patterns in Health and Disease. *Nutrients*, 12(2), 334. <https://doi.org/10.3390/NU12020334>
- Chazelas, E., Pierre, F., Druesne-Pecollo, N., Esseddik, Y., Szabo De Edelenyi, F., Agaesse, C., De Sa, A., Lutchia, R., Gigandet, S., Srouf, B., Debras, C., Huybrechts, I., Julia, C., Kesse-Guyot, E., Allès, B., Galan, P., Hercberg, S., Deschasaux-Tanguy, M., & Touvier, M. (2022). Nitrites and nitrates from food additives and natural sources and cancer risk: results from the NutriNet-Santé cohort. *International Journal of Epidemiology*, 51(4), 1106–1119. <https://doi.org/10.1093/IJE/DYAC046>
- Chey, W. D. (2013). The role of food in the functional gastrointestinal disorders: introduction to a manuscript series. *The American Journal of Gastroenterology*, 108(5), 694–697. <https://doi.org/10.1038/AJG.2013.62>



- Dashti, H. M., Mathew, T. C., & Al-Zaid, N. S. (2021). Efficacy of low-carbohydrate ketogenic diet in the treatment of type 2 diabetes. *Medical Principles and Practice, 30*(3), 223–235. <https://doi.org/10.1159/000512142>
- Debras, C., Chazelas, E., Srour, B., Druésne-Pecollo, N., Esseddik, Y., de Edelenyi, F. S., Agaësse, C., De Sa, A., Luchia, R., Gigandet, S., Huybrechts, I., Julia, C., Kesse-Guyot, E., Allès, B., Andreeva, V. A., Galan, P., Hercberg, S., Deschasaux-Tanguy, M., & Touvier, M. (2022). Artificial sweeteners and cancer risk: Results from the NutriNet-Santé population-based cohort study. *PLoS Medicine, 19*(3), e1003950. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003950>
- Dennis, M., Lee, A. R., & McCarthy, T. (2019). Nutritional Considerations of the Gluten-Free Diet. *Gastroenterology Clinics of North America, 48*(1), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.GTC.2018.09.002>
- Estruch, R., Ros, E., Salas-Salvadó, J., Covas, M.-I., Corella, D., Arós, F., Gómez-Gracia, E., Ruiz-Gutiérrez, V., Fiol, M., Lapetra, J., Lamuela-Raventós, R. M., Serra-Majem, L., Pintó, X., Basora, J., Muñoz, M. A., Sorlí, J. V., Martínez, J. A., Fitó, M., Gea, A., ... Martínez-González, M. A. (2018). Primary Prevention of Cardiovascular Disease with a Mediterranean Diet Supplemented with Extra-Virgin Olive Oil or Nuts. *New England Journal of Medicine, 378*(25), e34. <https://doi.org/10.1056/NEJM1800389>
- Fanzo, J., Drewnowski, A., Blumberg, J., Miller, G., Kraemer, K., & Kennedy, E. (2020). Nutrients, Foods, Diets, People: Promoting Healthy Eating. *Current Developments in Nutrition, 4*(6), nzaa069. <https://doi.org/10.1093/CDN/NZAA069>
- Filippou, C. D., Tsioufis, C. P., Thomopoulos, C. G., Mihas, C. C., Dimitriadis, K. S., Sotiropoulou, L. I., Chrysochoou, C. A., Nihoyannopoulos, P. I., & Tousoulis, D. M. (2020). Dietary Approaches to Stop Hypertension (DASH) Diet and Blood Pressure Reduction in Adults with and without Hypertension: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Advances in Nutrition, 11*(5), 1150–1160. <https://doi.org/10.1093/advances/nmaa041>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - World Health Organization. (2020). *Sustainable Healthy Diets. Guiding principles*. <https://doi.org/10.4060/CA6640EN>
- García-Maldonado, E., Gallego-Narbón, A., Vaquero, M. P., García-Maldonado, E., Gallego-Narbón, A., & Vaquero, M. P. (2019). ¿Son las dietas vegetarianas nutricionalmente adecuadas? Una revisión de la evidencia científica. *Nutrición Hospitalaria, 36*(4), 950–961. <https://doi.org/10.20960/NH.02550>
- Genoni, A., Lo, J., Lyons-Wall, P., Boyce, M. C., Christophersen, C. T., Bird, A., & Devine, A. (2019). A Paleolithic diet lowers resistant starch intake but



- does not affect serum trimethylamine-N-oxide concentrations in healthy women. *British Journal of Nutrition*, 121(3), 322–329. <https://doi.org/10.1017/S000711451800329X>
- Gibbs, J., & Cappuccio, F. P. (2022). Plant-Based Dietary Patterns for Human and Planetary Health. *Nutrients*, 14(8), 1614. <https://doi.org/10.3390/NU14081614>
- Gobbetti, M., Pontonio, E., Filannino, P., Rizzello, C. G., De Angelis, M., & Di Cagno, R. (2018). How to improve the gluten-free diet: The state of the art from a food science perspective. *Food Research International*, 110, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.FOODRES.2017.04.010>
- Haller, E., Issokson, K., Lebovits, J., Scarlata, K. (2021). Nutrition Therapy for Intestinal Disorders. En C. S. Pitchumoni, & T. Dharmarajan (eds.) *Geriatric Gastroenterology* (pp. 795–817). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30192-7_29
- Heileson, J. L. (2020). Dietary saturated fat and heart disease: a narrative review. *Nutrition Reviews*, 78(6), 474–485. <https://doi.org/10.1093/NUTRIT/NUZ091>
- Jung, S., Bae, H., Song, W. S., & Jang, C. (2022). Dietary Fructose and Fructose-Induced Pathologies. *Annual Review of Nutrition*, 42, 45–66. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-062220-025831>
- Khorshidian, N., Shadnoush, M., Zabihzadeh Khajavi, M., Sohrabvandi, S., Yousefi, M., & Mortazavian, A. M. (2021). Fructose and high fructose corn syrup: are they a two-edged sword? *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 72(5), 592–614. <https://doi.org/10.1080/09637486.2020.1862068>
- Kusmann, M., Abe Cunha, D. H., & Berciano, S. (2023). Bioactive compounds for human and planetary health. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1193848. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2023.1193848/BIBTEX>
- Lennerz, B. S., Mey, J. T., Henn, O. H., & Ludwig, D. S. (2021). Behavioral Characteristics and Self-Reported Health Status among 2029 Adults Consuming a “Carnivore Diet.” *Current Developments in Nutrition*, 5(12), nzab133. <https://doi.org/10.1093/CDN/NZAB133>
- Li, N., Wang, Q., Zhou, J., Li, S., Liu, J., & Chen, H. (2022). Insight into the Progress on Natural Dyes: Sources, Structural Features, Health Effects, Challenges, and Potential. *Molecules*, 27(10), 3291. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27103291>
- Ludwig, D. S. (2020). The Ketogenic Diet: Evidence for Optimism but High-Quality Research Needed. *The Journal of Nutrition*, 150(6), 1354–1359. <https://doi.org/10.1093/JN/NXZ308>
- Martini, D., da Costa Ribeiro, H., Gately, P., Mattes, R., Re, R., & Bier, D. (2023). Positive nutrition: shifting the focus from nutrients to diet for a healthy lifes-



- tyl. *Eating and Weight Disorders*, 28(1), 3. <https://doi.org/10.1007/S40519-023-01580-1>
- Molina, D. I., Chacón, J. A., Esparza, Á. S., & Botero, S. M. (2016). Depresión y riesgo cardiovascular en la mujer. *Revista Colombiana de Cardiología*, 23(3), 242–249. <https://doi.org/10.1016/J.RCCAR.2015.11.004>
- Mönckeberg B., F., & Muzzo B., S. (2015). La desconcertante epidemia de obesidad. *Revista Chilena de Nutrición*, 42(1), 96–102. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182015000100013>
- Mortensen, A., Aguilar, F., Crebelli, R., Di Domenico, A., Dusemund, B., Frutos, M. J., Galtier, P., Gott, D., Gundert-Remy, U., Leblanc, J. C., Lindtner, O., Moldeus, P., Mosesso, P., Parent-Massin, D., Oskarsson, A., Stankovic, I., Waalkens-Berendsen, I., Woutersen, R. A., Wright, M., ... Lambré, C. (2017). Re-evaluation of glutamic acid (E 620), sodium glutamate (E 621), potassium glutamate (E 622), calcium glutamate (E 623), ammonium glutamate (E 624) and magnesium glutamate (E 625) as food additives. *EFSA Journal*, 15(7), e04910. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4910>
- Neuhouser, M. L. (2019). The importance of healthy dietary patterns in chronic disease prevention. *Nutrition Research*, 70, 3–6. <https://doi.org/10.1016/J.NUTRES.2018.06.002>
- O’Hearn, A. (2020). Can a carnivore diet provide all essential nutrients? *Current Opinion in Endocrinology, Diabetes, and Obesity*, 27(5), 312–316. <https://doi.org/10.1097/MED.0000000000000576>
- Oteng, A. B., & Kersten, S. (2020). Mechanisms of Action of trans Fatty Acids. *Advances in Nutrition (Bethesda, Md.)*, 11(3), 697–708. <https://doi.org/10.1093/ADVANCES/NMZ125>
- Patterson, R. E., & Sears, D. D. (2017). Metabolic Effects of Intermittent Fasting. *Annual Review of Nutrition*, 37, 371–393. <https://doi.org/10.1146/ANNU-REV-NUTR-071816-064634>
- Rostami, K., Bold, J., Parr, A., & Johnson, M. W. (2017). Gluten-Free Diet Indications, Safety, Quality, Labels, and Challenges. *Nutrients*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/NU9080846>
- Saura, J. R., Reyes-Menendez, A., & Thomas, S. B. (2020). Gaining a deeper understanding of nutrition using social networks and user-generated content. *Internet Interventions*, 20, 100312. <https://doi.org/10.1016/J.INVENT.2020.100312>
- Sen, T., Barrow, C. J., & Deshmukh, S. K. (2019). Microbial pigments in the food industry—challenges and the way forward. *Frontiers in Nutrition*, 6(7), 418288. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2019.00007/BIBTEX>



- Shang, X., Liu, J., Zhu, Z., Zhang, X., Huang, Y., Liu, S., Wang, W., Zhang, X., Tang, S., Hu, Y., Yu, H., Ge, Z., & He, M. (2023). Healthy dietary patterns and the risk of individual chronic diseases in community-dwelling adults. *Nature Communications*, 14(1), 6704. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42523-9>
- Srour, B., Chazelas, E., Fezeu, L. K., Javaux, G., Pierre, F., Huybrechts, I., Hercberg, S., Deschasaux-Tanguy, M., Kesse-Guyot, E., & Touvier, M. (2022). Nitrites, Nitrates, and Cardiovascular Outcomes: Are We Living “La Vie en Rose” With Pink Processed Meats? *Journal of the American Heart Association*, 11(24). <https://doi.org/10.1161/JAHA.122.027627>
- Vaamonde, J. G., & Álvarez-Món, M. A. (2020). Obesidad y sobrepeso. *Medicine - Programa de Formación Médica Continuada Acreditado*, 13(14), 767–776. <https://doi.org/10.1016/J.MED.2020.07.010>
- Vincent, A., Grande, F., Compaoré, E., Amponsah Annor, G., Addy, P.A., Aburime, L.C., Ahmed, D., Bih Loh, A.M., Dahdouh Cabia, S., Deflache, N., Dembélé, F.M., Dieudonné, B., Edwige, O.B., Ene-Obong, H.N., Fanou Fogny, N., Ferreira, M., Omaghomi Jemide, J., Kouebou, P.C., Muller, C., Nájera Espinosa, S., Ouattara, F., Rittenschober, D., Schönfeldt, H., Stadlmayr, B., van Deventer, M., Razikou Yiagnigni, A. & Charrondiére, U.R. (2020). *FAO/INFOODS Food Composition Table for Western Africa (2019) User Guide & Condensed Food Composition Table / Table de composition des aliments FAO/INFOODS pour l’Afrique de l’Ouest (2019) Guide d’utilisation & table de composition des aliments condensée*. FAO. Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca7779b>
- Wylie-Rosett, J., Aebbersold, K., Conlon, B., Isasi, C. R., & Ostrovsky, N. W. (2013). Health effects of low-carbohydrate diets: where should new research go? *Current Diabetes Reports*, 13(2), 271–278. <https://doi.org/10.1007/S11892-012-0357-5>
- Xiao, Y. L., Gong, Y., Qi, Y. J., Shao, Z. M., & Jiang, Y. Z. (2024). Effects of dietary intervention on human diseases: molecular mechanisms and therapeutic potential. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9, 59. <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01771-x>
- Zhang, Y., & Giovannucci, E. L. (2023). Ultra-processed foods and health: a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(31), 10836–10848. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2084359>
- Zhang, Y., Zhuang, P., Wu, F., He, W., Mao, L., Jia, W., Zhang, Y., Chen, X., & Jiao, J. (2021). Cooking oil/fat consumption and deaths from cardiometabolic diseases and other causes: prospective analysis of 521,120 individuals. *BMC Medicine*, 19, 92. <https://doi.org/10.1186/s12916-021-01961-2>

La salinización del suelo cultivable: causas, problemática actual asociada al cambio climático y áreas de oportunidad

Patricia Paulina Hernández Victoria¹, Héctor Flores Magdaleno^{1*}, Abel Quevedo Nolasco¹, Jorge Flores Velázquez¹, Gustavo Cruz Cárdenas² y Nora Meráz Maldonado¹

¹Colegio de Postgraduados (COLPOS), Departamento de Hidrociencias, Motecillos, Estado de México, México.

²COFAA, Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Michoacán, Jiquilpan, Michoacán, México.

*Autor de correspondencia: mhector@colpos.mx

Palabras clave:

análisis de imagen, cambio climático, monitoreo, remediación de suelos salinos, salinidad.

Resumen

La salinización del suelo es una problemática que afecta principalmente a los agricultores y atenta contra la soberanía alimentaria. El objetivo de este trabajo es comentar los distintos conceptos del suelo, la salinización del suelo, las principales causas de salinización, la gravedad de la problemática, la distribución de suelos salinos a nivel mundial y a nivel nacional y los probables efectos del cambio climático sobre la salinización del suelo. Además, también se desarrolla la problemática actual del monitoreo de suelos salinos, así como sus probables soluciones mediante análisis de imágenes, tanto satelitales como con cámaras acopladas a drones. Por último, se integran las limitaciones de este nuevo enfoque para el diagnóstico de salinización y se describen las soluciones actuales para la remediación de suelos salinos.

¿Qué es el suelo?

El suelo es un recurso no renovable; una vez perdido, no se puede recuperar (Garrido, 2016). Existen diversos conceptos sobre el suelo, dependiendo de la ciencia que lo describa, desde el punto de vista físico, químico o biológico. Algunos de los conceptos más utilizados son los siguientes:

1. Cuerpo natural físico, dinámico, vivo y con múltiples funciones ubicado sobre la parte superficial de la corteza terrestre. Derivado de un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos sobre la roca madre (material original). El suelo está formado por tres fases: sólida, líquida y gaseosa, donde los componentes

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 83-101.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14707376>

Recibido: 12 septiembre 2024
Revisado: 11 de noviembre 2024
Aceptado: 30 de noviembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



sólidos provienen de la desintegración o alteración física y química de las rocas y minerales. Se caracterizan por formar uno o más horizontes que se distinguen del material que los originó (Llerena, 2020; Aceves, 2011; Porta et al., 2019)

2. Sistema complejo en la intersección de la atmósfera, litosfera, hidrosfera y biosfera que es fundamental para la producción de alimentos y clave para la sostenibilidad a través de su apoyo a importantes servicios sociales y ecosistémicos (Lehmann et al., 2020).

3. Edafológicamente hablando es un medio que ofrece los nutrientes requeridos para las plantas y un sustrato que sirve de soporte para el crecimiento de las raíces. Es el hogar de una gran diversidad de microorganismos que impactan en el crecimiento de los cultivos a través de diferentes funciones, como la descomposición de la materia orgánica, lo que convierte los nutrientes en formas disponibles para las plantas (FAO, 2009; Rosales et al., 2006).

Una definición holística del suelo propuesto por los autores de este trabajo sería la siguiente: El suelo es un componente natural formado a partir de un material parental que va evolucionando a lo largo del tiempo, mediante una serie de interacciones físicas (como la lluvia, el viento y el calor), químicas (como la meteorización) y biológicas (como la descomposición de la materia orgánica). El suelo constituye la base de la cadena trófica ya que actúa como soporte y fuente de nutrientes para los productores primarios, muchos de los cuales representan importantes especies para la alimentación humana.

Tras explorar las principales definiciones del suelo, a continuación, abordamos una problemática que repercute en el funcionamiento óptimo del sistema y atenta contra los múltiples beneficios que la sociedad obtiene a través del suelo para asegurar la soberanía alimentaria: la salinización del suelo.

¿Qué es la salinización del suelo? y ¿Por qué es tan grave?

La salinización del suelo ocupa el segundo lugar como causa principal de la degradación de la tierra, solo detrás de la erosión. A lo largo de 10,000 años, la salinización del suelo cultivable ha colapsado diversas sociedades agrícolas, pues existen registros históricos de migraciones que muestran el fracaso de civilizaciones por el aumento de salinidad en campos agrícolas, impactando directamente en la productividad de sus cultivos; Mesopotamia es el caso más conocido (ahora Irak) (Leidi & Pardo, 2002., Zaman et al., 2018).

El exceso de sales presentes en el suelo representa una amenaza para la productividad agrícola, la salud ambiental y el bienestar financiero. El costo de degradación del suelo inducido por la sal en 2013 fue de \$441 dólares por hectárea. Las



pérdidas económicas anuales actuales podrían ser de \$27 mil millones de dólares (Zaman et al., 2018). La salinidad del suelo es quizá el problema más serio que enfrenta la agricultura en estos días, provoca una disminución entre el 10 y el 25% del rendimiento en la producción de diversos cultivos, puede impedir la cosecha por completo y conducir a la desertificación (Otero et al., 2008; Grieve et al., 2012; López et al., 2008). Además, 2.6 mil millones de personas dependen directamente de estas tierras (Koutroulis, 2019).

Numerosas investigaciones (de Souza et al., 2012; Zhang et al., 2019; Sheldon et al., 2017) muestran los efectos negativos de la salinidad en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la microflora, la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas. En presencia de estos efectos nocivos, ha sido un desafío para el sistema agrícola satisfacer las demandas alimentarias mundiales tanto actuales como futuras, así como garantizar la seguridad alimentaria (Sahab et al., 2021). El alto valor del pH y la conductividad eléctrica junto con el bajo potencial de permeabilidad, característico de los suelos salinos, afectan directamente la actividad microbiana, lo que reduce la disponibilidad de nutrientes para las plantas y, en consecuencia, afecta el crecimiento de los cultivos (Xu et al., 2020).

Muy pocas publicaciones tratan aspectos socioeconómicos de la degradación de la tierra inducida por la sal. Por ello, se recomienda invertir en la remediación de las tierras afectadas e incluir los costos de remediación y acciones en una estrategia nacional más amplia para la seguridad alimentaria (Qadir et al., 2014).

¿Por qué se saliniza el suelo?

La salinización del suelo se divide en primaria y secundaria (Allbed & Kumar, 2013). La primera ocurre de manera natural, ya que es causada por la incorporación salina mediante el intemperismo de rocas y minerales primarios, formados in situ (nativas), o bien, son transportados por agua, viento, tipo de topografía y procesos continuos de inundación- evaporación (Zhou et al., 2013; Rhoades, 1990). Otro tipo de condiciones del perfil del suelo que delimitan que exista una salinización primaria son: la textura, la profundidad, el pH, la estructura, la porosidad, la permeabilidad, la capacidad de retención de humedad, el intercambio catiónico, la conductividad eléctrica y la fertilidad. En las zonas áridas el viento puede llegar a arrastrar una gran cantidad de partículas en suspensión (sulfatos y carbonatos), además en estas regiones las sales también pueden ascender por capilaridad (Mata, 2014).

La salinización secundaria es originada por actividades antropogénicas, especialmente por prácticas agrícolas inadecuadas como el manejo incorrecto del agua, el uso de agua de baja calidad para el riego, la aplicación excesiva de fertilizantes químicos,



el empleo de agua de riego salina, los cambios de uso del suelo, el sobrepastoreo en las zonas pecuarias, además las condiciones de salinización pueden empeorar con condiciones de drenaje deficiente (Peña et al., 2020; Rozema, 1996). La actividad humana actúa de manera similar a las enzimas, acelerando o catalizando los procesos naturales. Este efecto es pernicioso, ya que si un proceso de manera natural tarda hasta siglos para ocurrir, nuestra intervención puede reducir drásticamente el tiempo hasta años e incluso meses, dependiendo de la intensidad con la que se lleve a cabo.

La salinidad sigue un ciclo natural (Figura 1), por lo tanto, no podemos mitigar el problema de raíz, puesto que los iones presentes en el extracto de saturación (causantes de la salinidad) han estado y existirán hasta el fin de la tierra, es decir, es un proceso continuo, sin embargo, podemos aprender a identificarlo y gestionarlo. Las principales sales que afectan el suelo por orden de importancia son el cloruro de sodio, sulfato de calcio, bicarbonato de calcio, cloruro de magnesio y bicarbonato de magnesio, (Basurto et al., 2008). Cuando un suelo contiene cualquier sal descrita anteriormente en altas concentraciones se habla de suelos salinos, sin embargo, cuando la cantidad de la sal que predomina es sodio se clasifica como un suelo sódico.



Figura 1. Ciclo de la salinización del suelo por factores primarios y secundarios (Figura realizada por los autores).



¿Cuál es la distribución de suelos afectados por salinidad a nivel mundial?

La FAO (2021) publicó el primer mapa mundial de suelos salinos (GSASmap) (Figura 2), con la colaboración de 118 países, que representan el 85% de la superficie terrestre global. Este mapa incluye 257,419 puntos con datos medidos *in situ* y contó con la participación de 350 expertos nacionales. Este enfoque colaborativo permite la posibilidad de actualizaciones periódicas en el futuro. De acuerdo con el estudio, 424 millones de hectáreas de suelo superficial (0-30cm de profundidad) y 833 millones de hectáreas de subsuelo (30-100 cm de profundidad) están afectados por sal. Existen diferentes estimaciones que muestran una pérdida mundial de 1.5 millones de hectáreas de tierras cultivables por año (Foley et al., 2005).



Figura 2. Distribución espacial del exceso de sales y el tipo de limitaciones presentes en el suelo alrededor del mundo. Mapa elaborado en la Plataforma Hand-in-Hand Geospatial (FAO,2021).

Otras estimaciones indican que existen alrededor de 800 millones de hectáreas afectadas por sal, de las cuales 77 millones se encuentran en áreas irrigadas, Zaman et al. (2018) documentó que estas áreas son más susceptibles a la degradación de la tierra. Cada año los suelos se vuelven más improductivos debido a la paulatina acumulación de sales (Nikalje et al., 2018). Australia posee 357.3 millones de hectáreas afectadas por salinidad del suelo; mientras que México y Centro América presentan 2 millones de hectáreas (Amaya, 2019).

¿Cuál es la distribución de suelos afectados por la salinidad en México?



La superficie afectada en México es de 600 mil hectáreas, la mitad de esta superficie presenta rendimientos muy bajos o ya se encuentran abandonadas (Mata, 2014). Aproximadamente la mitad del territorio nacional posee regiones áridas o semiáridas, desde el norte y hasta el centro del país, donde el problema de salinización sigue avanzando principalmente en los distritos de riego (González, 2012).

La Figura 3 muestra la distribución espacial a nivel nacional de los suelos salinos, así como los suelos que presentan una conductividad eléctrica mayor o igual a 4 dS/m, parámetro indicativo de algún tipo de salinidad. Los datos tanto a nivel mundial como nacional están muy desactualizados, en México los datos más recientes datan del año 2014 para conductividad eléctrica y 2004 para salinidad.



Figura 3. Distribución espacial de suelos salinos en los Estados Unidos Mexicanos
Elaboración propia. Fuente: INEGI, 2014 y SEMARNAT, 2004.

¿Qué impacto tiene el cambio climático sobre la salinización de los suelos?

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en 2013 define al cambio climático como los cambios en las condiciones medias (promedio) del sistema atmósfera-hidrosfera-tierra en un lapso de tiempo no menor a 30 años; este cambio de clima puede estar directa o indirectamente atribuido a la actividad antropogénica.

El cambio climático y la salinización del suelo generan un ciclo que se refuerza a sí mismo, con impactos perjudiciales en los ecosistemas y en la estabilidad climática global (Shokri et al., 2024). El cambio climático podría generar efectos negativos en la agricultura (Ojeda et al., 2010). De acuerdo con Mazuela (2013) se prevé que las zonas de clima templado y suelos fértiles experimenten afectaciones en décadas venideras debido a la escasez de lluvias con una tendencia hacia la salinización. Por otro lado, Sahab et al. (2021) señalan que las zonas con baja precipitación y alta evaporación, como las zonas áridas y semiáridas, son más vulnerables a la acumulación



de sales. Existen diversas problemáticas que se verán agravadas debido al cambio climático, entre las que destacan el calor, la salinidad, la sequía, las inundaciones y el anegamiento (Ortiz, 2008). Se pronostica, además, una disminución en la productividad de cultivos importantes, lo que tendría diversas consecuencias para la seguridad alimentaria (Vargas, 2007).

Según Perri et al. (2022), el impacto del clima varía según la región, es decir, en zonas áridas con baja precipitación, la salinización tiende a aumentar debido a la reducción de humedad en el suelo, lo que, a su vez, dificulta la eliminación de sal. En cambio, las áreas con un patrón estacional de lluvias, como los climas mediterráneos, experimentarán una menor acumulación de sal debido a una eliminación más eficiente de la sal durante la estación húmeda.

Se han pronosticado diversos modelos sobre los posibles impactos del cambio climático en la salinización del suelo, por ejemplo, Illangasekare et al. (2006) mencionan que esta problemática puede acelerarse por diferentes razones, por ejemplo, que el aumento de las temperaturas traerá consigo un aumento en la evaporación del suelo y por ende los requisitos de agua de los cultivos se incrementaran, esto resultará en la salinización del suelo en áreas que ya son propensas a la salinidad. Las regiones costeras estarán sujetas a un riesgo creciente de salinización por aumento de los niveles del agua de mar, añadiendo más agua salada a los acuíferos costeros y aumentando la salinidad de aguas subterráneas. La probabilidad de tormentas extremas y tsunamis puede causar inundaciones de agua de mar, resultando en la infiltración de agua salada en los suelos y la contaminación de los recursos hídricos subterráneos.

Un estudio realizado por Hassani et al. (2021) reveló futuros puntos críticos que serán afectados por el cambio climático en términos de salinización del suelo; las áreas más vulnerables serán América del Sur, el sur y el oeste de Australia, México, el suroeste de los Estados Unidos y Sudáfrica. Por el contrario, se proyecta una disminución de la salinidad del suelo en regiones como el noroeste de los Estados Unidos, la península de Somalia en África, Europa del Este, Turkmenistán y Kazajistán. Otros estudios indican que el aumento de la salinidad del suelo podría conducir a una reducción global en el nivel de carbono orgánico del suelo (Haj-Amor et al 2021).

En México existen pocos estudios que aborden la salinización del suelo y el cambio climático. Uno de los trabajos es el desarrollado por Pulido (2016) en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora; Pulido concluye que los efectos del calentamiento global (aumento de temperatura, reducción de las precipitaciones, disminución del agua disponible para riego y el aumento de la concentración de sales en el agua de riego) contribuyeron al incremento en las superficies afectadas por sales, además



los problemas de salinidad del suelo en el Distrito de Riego incrementaron 24.1 y 15.8% en los estratos del suelo a 30 y 60 cm de profundidad, respectivamente, en un periodo comprendido entre 1970-2001 y existió una reducción del 15.2% en la producción agrícola.

Corwin (2020) menciona que han pasado por alto las consecuencias del cambio climático y será necesario monitorear y mapear los cambios en el grado de salinidad del suelo. Existen pocas referencias puntuales tanto a nivel mundial como nacional de la verdadera extensión de salinidad en tierras, pues la mayoría son predicciones debido al alto costo que representa obtener fuentes medibles en laboratorio en grandes extensiones. Es necesario eficientizar los diagnósticos de salinización y tener una buena gestión de las tierras cultivables.

¿Por qué es problemático el monitoreo de salinidad?

La distribución de las sales en el suelo tanto espacial como temporal es muy heterogénea, pues tiene gran fluctuación debido a que la salinización es un proceso complejo y variable a diferentes escalas (Ruiz et al., 2007). Al ser un proceso tan dinámico ¿cuál es el mejor método para abordarlo?, ¿será que, a escala de parcela, municipal, regional, nacional o mundial? Pues bien, esto no está determinado, siempre dependerá de los objetivos, del enfoque y del presupuesto destinado a la investigación.

Hopmans et al. (2021) mencionan que las publicaciones más recientes sobre la salinización en el suelo son aplicadas y apenas agregan nueva investigación básica, pues la mayoría de los conceptos presentados datan de antes del año 2000. El aumento de los artículos que contienen “soil salinity” en su título, de 1995 al 2019, crecieron un 318%, para el 2024 el número de resultados es de 2, 280,000 publicaciones. Los autores informan que, aunque no es una búsqueda exhaustiva sí es indicativa.

Los costos de diagnóstico de salinización por métodos tradicionales (laboratorio) son elevados. Por ejemplo, para medir la salinización en una muestra simple de suelo, el precio ronda alrededor de los \$666.00 pesos mexicanos (LANISAF, 2024). Sin embargo, una muestra no es suficiente para evaluar la salinidad en una hectárea, al menos 5 muestras son requeridas si las condiciones de terreno son homogéneas, si no es así, debe elevarse el número de toma de muestras; en este supuesto, el costo sería de \$3330 pesos mexicanos por hectárea. Ahora bien, ¿qué sucede si se desea evaluar la salinidad en las 600 mil hectáreas mexicanas degradadas por algún tipo de salinidad? Los costos serían exorbitantes, alcanzando un total de \$ 1,998,000,000 pesos mexicanos para evaluar la salinización en todo el país.



¿Cómo podemos efficientizar el diagnóstico de salinización en tierras cultivables?

El análisis de imágenes, especialmente para el mapeo espacial, se ha convertido en una tecnología poderosa de gran crecimiento y desarrollo en el ámbito de la teledetección; esta técnica se utiliza para obtener un gran número de bandas de distintas longitudes de onda medidas en un solo píxel (Rekha et al., 2012); además, posee múltiples ventajas para monitorear los procesos de salinización del suelo con gran eficiencia a menor costo y una buena resolución tanto temporal (cada 7 o 15 días) como espacial (desde 15 a 30 metros dependiendo del tipo de sensor utilizado) (Muller & Van Niekerk, 2016; Wang et al., 2020).

Ghabour y Daels (1993) mencionan que la obtención de datos de salinidad del suelo es más eficiente y económica cuando se utilizan los datos de reflectancia obtenidos por percepción remota. Los suelos salinos presentan características morfológicas y espectrales distintivas en la superficie del suelo a los suelos no salinos, con una reflectancia general más elevada en las regiones visible e infrarroja cercana del espectro electromagnético (Ben-Dor et al., 2009). Con base en estas características espectrales asociadas a la salinidad del suelo, se han desarrollado distintos índices de salinidad para su estimación, un ejemplo es el índice de salinidad de diferencia normalizada (Mandal, 2022).

Una opción más reciente es la utilización de imágenes capturadas con drones acoplados a cámaras con diversos sensores que permiten generar diferentes diagnósticos, entre los que se encuentran las gestiones hídricas, la fertilización y la detección de enfermedades, gracias a estos datos se pueden generar mapas agronómicos (González et al., 2013). Sin embargo, en la actualidad las imágenes obtenidas con drones han sido poco utilizadas para detectar problemas de salinización del suelo. La Figura 4 muestra las diferencias de resolución de una imagen satelital (Landsat 8) y de una imagen obtenida con una cámara multiespectral (Parrot sequoia) acoplada a un dron en 100 hectáreas agrícolas en el estado de Michoacán.

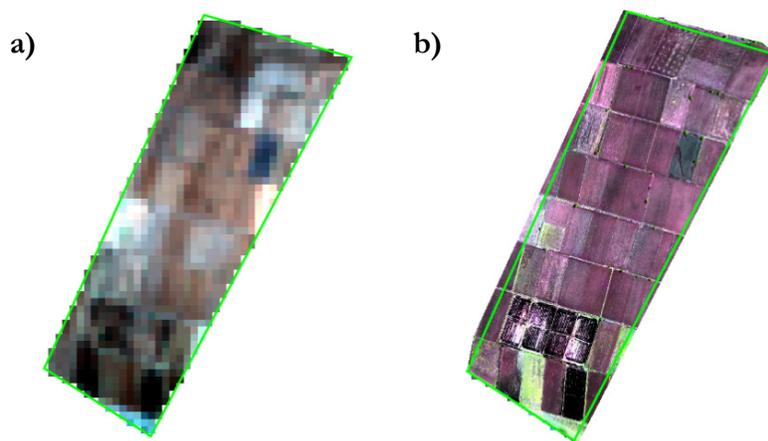


Figura 4. a) Imagen obtenida con un satélite LANDSAT 8 (tamaño de pixel:30 m.), b) Imagen obtenida con una cámara multispectral Parrot Sequoia (tamaño de pixel: 15cm).

Zhang et al. (2022) fusionaron datos de medición en campo, imágenes obtenidas con drones y con el satélite Sentinel-2A para desarrollar modelos de aprendizaje automático de estimación de la salinidad del suelo a diferentes escalas en el Yellow River Delta de China. Entre los diferentes índices espectrales, se examinaron algunas bandas individuales, índices de vegetación e índices de salinidad, el modelo basado en redes neuronales fue el que mostró el mejor desempeño en términos de predicción.

Es recomendable analizar la dinámica de la salinidad del suelo junto con el uso del suelo para comprender de manera más profunda las tendencias de estabilidad y variabilidad de los diferentes grados de salinidad en suelos (Zhang et al., 2022), debido al constante cambio de los usos y cobertura de suelo a través del tiempo.

¿Cuáles son las limitaciones existentes con el uso de sensores remotos?

Allbed y Kumar (2013) mencionan dos limitaciones clave en el análisis de salinidad del suelo mediante sensores remotos. La primera es que estos sensores solo evalúan la superficie del suelo a través de la reflectancia espectral, lo que impide analizar la salinidad en el perfil, además de que la salinidad presenta una gran heterogeneidad tanto espacial como temporal. La segunda limitación es que la detección directa de salinidad se dificulta en regiones áridas y semiáridas con vegetación densa, ya que la vegetación puede generar una mezcla espectral que complica el análisis, por el contrario, en suelos desnudos resulta más fácil, puesto que las costras salinas y la vegetación dispersa, son visibles en la superficie, lo que permite obtener información de los tipos y la cantidad de sal, en función de las firmas espectrales de la superficie del suelo.

Por otro lado, el porcentaje de nubosidad en las imágenes satelitales es una limitante importante de mencionar, pues si la imagen contiene un alto porcentaje



dentro del área de interés es casi imposible llevar a cabo las metodologías pertinentes para el estudio en caso.

¿Cuáles son las soluciones a los problemas de salinización?

Los suelos salinos se han registrado en una amplia gama de ambientes bajo muchas condiciones hidrológicas y fisiográficas diferentes. Una distribución tan amplia nos dice que ninguna opción o técnica única de adaptación o mitigación será aplicable a todas las áreas (Zaman et al., 2018). Por lo tanto, para controlar la salinización del suelo se han desarrollado diversas opciones de manejo, pero ninguna garantiza la sostenibilidad a largo plazo. Las prácticas varían ampliamente y dependen del tipo de suelo, ubicación del paisaje, geohidrología, clima y otros factores locales (Hopmans et al., 2021).

Es crucial implementar técnicas agronómicas adecuadas para mejorar las características del suelo salino de manera eficaz (Huang et al., 2016). Una de las prácticas más frecuentes para eliminar o reducir la concentración de sales en el suelo es el lavado, cuyo método consiste en originar un flujo de agua descendente a través del perfil para arrastrar las sales, se realizan tanto de manera vertical como horizontal (Mata et al., 2014). Aunque es un buen método para cambiar (no mitigar) el posicionamiento de las sales, no es una práctica universal, pues se debe conocer la composición y concentración de sales en suelo, y también se deben realizar las determinaciones de la composición del agua con la que se harán los lavados, evitando así que empeore la salud del ecosistema.

De las técnicas de gestión disponibles, algunas se centran en mejorar las propiedades de las plantas (preparación de semillas, forestación, selección de cultivos, mejoras genéticas, agrosilvicultura), algunas están bien enfocadas en mejorar las propiedades del suelo (enmiendas químicas, biocarbón, vermicompost, compost, inoculantes microbianos, electro remediación) y algunas técnicas mejoran tanto las propiedades del suelo como las de las plantas de manera sinérgica (Sahab et al., 2021).

Xu et al. (2023) señalan que los métodos actuales para la recuperación de suelos salinos incluyen métodos físicos, biológicos y químicos, que están descritos desde hace tiempo y han sido ampliamente documentados, entre ellos por Aceves (2011) (Tabla 1).

Tabla 1. Métodos de recuperación de suelos salinos

Físicos	Tratamiento mecánico al suelo: subsuelo, arado profundo, aplicación de arena e inversión del perfil → Para romper capas endurecidas (pisos de arado, capas de carbonatos y sulfatos precipitados) que impiden el paso del agua a través del perfil del suelo.
----------------	---



Biológicos	Uso de materia orgánica (estiércol y composta) → durante el proceso de descomposición los microorganismos presentes en el suelo liberan CO ₂ , cuando se combina con agua forman ácido carbónico, que puede solubilizar sales de calcio precipitadas en el suelo. Uso de plantas tolerantes a sales → Impiden que el agua se evapore directamente de la superficie del suelo y las raíces dejan pequeños conductos por los cuales el agua circula mejor en el suelo.
Eléctricos	Se hace pasar la corriente eléctrica directa en un volumen de suelo determinado → Con electroósmosis se extraen mediante la corriente eléctrica las sales que se encuentran en la solución del suelo; sin embargo, los costos actuales son prohibitivos para utilizarlos en la recuperación de suelos agrícolas.
Químicos	Agregan sustancias al suelo con la finalidad de solubilizar el calcio existente o agregarlo directamente en forma soluble en caso de que no exista, propiciando intercambio catiónico y sustitución de sodio por calcio en el complejo de intercambio con el fin de lograr la floculación de los coloides en el suelo → Cloruro de calcio, yeso, azufre, ácido sulfúrico, sulfato ferroso, sulfato de aluminio, polisulfuro de calcio, calcita y dolomita.
Hidrotécnicos	Controlan la cantidad y calidad química del agua disponible para mantener las sales solubles y las intercambiables de manera que no interfiera, ni de forma directa ni indirecta con el crecimiento de los cultivos.

Fuente: Tomado de Aceves (2011)

Una vez que los problemas de salinidad se diagnostican adecuadamente, se puede formar un programa integrado de recuperación de suelos que incluya una combinación de métodos para rectificar los problemas. Sin embargo, algunas tecnologías modernas, como las mejoras genéticas y eléctricas son difíciles de desarrollar debido a sus altos costos y baja eficiencia (Amombo et al., 2022). Además, otra limitación es que los métodos previamente mencionados, cuando se aplican en grandes áreas, resultan muy costosos, tanto por las cantidades de material que se utilizan como por la aplicación de los mismos, debido a que en casos específicos se requiere de equipo especializado (Hopmans et al., 2021; Zaman et al., 2018). Por el contrario, los métodos químicos se consideran los más rentables y ampliamente utilizados para mejorar los suelos salinos (Xu et al., 2023).

El desafío futuro consiste en desarrollar estrategias que aumenten la producción de alimentos y al mismo tiempo preserven la funcionalidad ecológica del suelo, minimicen los riesgos para la salud humana y promuevan el uso sostenible de nuestros recursos de tierra y agua para uso agrícola. En este contexto, un estudio realizado por Xu et al. (2023) documentó el uso de una enmienda compuesta por fósforo y yeso, ácido húmico, bentonita y carboximetilcelulosa sódica que contribuyó sustancialmente a la mejora de los atributos físicos, químicos, biológicos y nutrimentales de suelos salinos. Por otro lado, Xing et al. (2024) demostraron que el uso de bio-carbón desempeña un papel clave en la modificación de la composición elemental del suelo, ya que su estructura porosa puede mejorar la disposición de los agregados, optimizando las características de porosidad y permeabilidad en suelos salinos.



Conclusiones

Dado que el suelo es un recurso de vital importancia para el ser humano, es necesario desarrollar nuevas técnicas de investigación y eficientizar el diagnóstico de salinización, principalmente en tierras agrícolas. El cambio climático juega un rol importante en el impacto de salinización del suelo, agudizando los impactos negativos. Al ser el clima el principal factor que afecta la tolerancia de los cultivos a las sales, aunado al cambio climático, supone que, en décadas venideras, las zonas de clima templado se verán afectados por la escasez de lluvias y una tendencia a la salinización, mientras que en áreas secas también se conducirá hacia la salinización y desertificación de las tierras. En México el 60% del territorio posee un clima árido, por lo que tiene una mayor tendencia a la salinización del suelo. Se requiere realizar una actualización de datos a nivel mundial y nacional para tomar medidas de gestión y no atentar contra la soberanía alimentaria, pues es de esperarse que exista un gran incremento en la salinización de las tierras agropecuarias y con ello disminuya la productividad agrícola. Las imágenes satelitales y obtenidas mediante drones auguran un importante desarrollo tecnológico para el diagnóstico de salinización, más rentable y eficaz, para poder comenzar a realizar las gestiones de remediación de los suelos más afectados, pero con un diagnóstico puntual, de esta manera optar por el mejor método de remediación de suelos salinos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Agradecimientos

Patricia Paulina Hernández Victoria con CVU agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca otorgada para su formación del programa de Doctorado en Hidrociencias.

Referencias

- Aceves, E. (2011). *El ensalitramiento de los suelos bajo riego (Segunda edición)*. Colegio de Postgraduados.
- Allbed, A. & Kumar L. (2013). Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review. *Advances in remote sensing*, 2(4), 373-385. doi:10.4236/ars.2013.24040
- Amaya, C. (2019). *Comparación de técnicas de estimación del grado de salinidad en suelos con contenido de humedad mediante el procesamiento de imágenes multiespectrales* [tesis de



- licenciatura, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional USS. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/6618>.
- Amombo, E., Ashilenje, D., Hirich, A., Kouisni, L., Oukarroum, A., Ghoulam, C., ... & Nilahyane, A. (2022). Exploring the correlation between salt tolerance and yield: Research advances and perspectives for salt-tolerant forage sorghum selection and genetic improvement. *Planta*, 255(3), 71. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-03847-w>
- Ben-Dor, E., Metternicht, G., Goldshleger, N., Mor, E., Mirlas, V. & Basson, U. (2008). Review of Remote Sensing-Based Methods to Assess Soil Salinity. *Remote Sensing of Soil Salinization*, 1, 39–60. doi:10.1201/9781420065039.ch3
- Corwin, D. L. (2020). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 842-862. <https://doi.org/10.1111/ejss.13010>
- de Souza Silva, C. M. M., & Fay, E. F. (2012). Effect of salinity on soil microorganisms. En M. C. Hernandez-Soriano, *Soil health and land use management* (pp. 177-198). DOI: 10.5772/28613
- Foley, J. A., Defries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science (New York, N.Y.)*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Garrido, R. R. (2016). *Biogeoquímica del fósforo en el suelo: Optimización de criterios para un uso agronómico eficiente y ambientalmente aceptable de un recurso no renovable* [tesis de doctorado, Universidad de Sevilla]. Repositorio institucional <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=181297>
- Ghabour, T & L. Daels. (1993). The use of GIS for soil degradation study in the Western Nile Delta of Egypt. *Journal soil science*. 33(4), 355-370. <https://doi.org/10.1063/1.44483>
- González, F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Primera edición*. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de medio Ambiente y Recursos Naturales.
- González, M., & Rodríguez, M. (2013). Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 61, 285-308. <file:///D:/Usuarios/consejoeditorial/Downloads/Dialnet-AplicacionesDe-LaTeledeteccionEnDegradacionDeSuelos-4157742.pdf>
- Grieve, C. M., Grattan, S. R., & Maas, E. V (2012). Plant salt tolerance. En W. W. Wallender & K. K. Tanji (eds.), *Agricultural salinity assessment and management* (pp. 405-459). Reston.



- Haj-Amor, Z., Araya, T., Kim, D.-G., Bouri, S., Lee, J., Ghiloufi, W., Yang, Y., Kang, H., Kumar Jhariya, M., Banerjee, A., Lal, R. (2022). Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: A review. *Science of the Total Environment*, 843, 156946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156946>
- Hassani, A., Azapagic, A., & Shokri, N. (2021). Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century. *Nature Communications*, 12(1), 6663. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26907-3>
- Hopmans, J. W., Qureshi, A.S., Kisekka, I., Munns, R., Grattan, S.R., Rengasamy, P., Ben-Gal, A., Assouline, S., Javaux, M., Minhas, P.S., Raats, P.A.C., Skaggs, T.H., Wang, G., De Jong van Lier, Q., Jiao, H., Lavado, R.S., Lazarovitch, N., Li, B., Taleisnik, E. (2021). Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity. *Advances in agronomy*, 169, 1-191. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.03.001>
- Huang, L. H., Liang, Z. W., Suarez, D. L., Wang, Z. C., Wang, M. M., Yang, H. Y., & Liu, M. (2016). Impact of cultivation year, nitrogen fertilization rate and irrigation water quality on soil salinity and soil nitrogen in saline-sodic paddy fields in Northeast China. *The Journal of Agricultural Science*, 154(4), 632-646.
- Illangasekare, T., Tyler, S.W., Clement, T.P., Villholth, K. G., Perera, A. P. G. R. L., Obeysekera, J., ... & Jensen, K. (2006). Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka. *Water Resource Research*, 42(5), W05201. <https://doi.org/10.1029/2006WR004876>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). *Conjunto de datos de perfiles de suelos. Escala 1: 250 000. Serie II Continuo Nacional*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. (Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. Cambridge University Press.
- Koutroulis, A. G. (2019). Dryland changes under different levels of global warming. *Science of the Total Environment*, 655(1), 482-511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.215>
- Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal (s. f.). *Catálogo de servicios*. Consultado el 12 de diciembre de 2024. https://lanisaf.chapingo.mx/catalogo_jun2024/
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553. doi:10.1038/s43017-020-0080-8



- Leidi, E. O & Pardo, J.M. (2002). Tolerancia de los cultivos al estrés salino: qué hay de nuevo. *Revista de investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 2, 1-12. https://www.researchgate.net/publication/38305106_Tolerancia_de_los_cultivos_al_estres_salino_que_hay_de_nuevo
- López, M., Arbona, V., Pérez, R., & Gómez, A. (2008). Relationship between salt tolerance and photosynthetic machinery performance in citrus. *Environmental and Experimental Botany*, 62(2), 176–184 <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.08.002>
- Llerena, F. (2020). *Los problemas de salinidad de los suelos agrícolas bajo riego*. Colegio de Postgraduados.
- Mandal, A.K. (2022). The need for the spectral characterization of dominant salts and recommended methods of soil sampling and analysis for the proper spectral evaluation of salt affected soils using hyper-spectral remote sensing. *Remote Sensing Letters*, 13(6), 588–598. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2059414>
- Mata, I., Rodríguez, M., López, J., & Vela, G. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente*, 1(5), 26-35. http://cbs1.xoc.uam.mx/e_bios/docs/2014/05_SALINIDAD_EN_SUELOS_ESPANOL.pdf#:~:text=Din%C3%A1mica%20de%20la%20salinidad%20en%20los%20suelos.%20La%20salinidad%20y
- Mazuela, P. (2013). Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Idesia (Arica)*, 31(2), 3-4. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000200001>
- Muller, S.J & A. Van Niekerk. (2016). An evaluation of supervised classifiers for indirectly detecting salt-affected areas at irrigation scheme level. *International journal of applied earth observations and geoinformation*, 49, 138-150. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.02.005>
- Nikalje, G. C., Srivastava, A. K., Pandey, G. K., & Suprasanna, P. (2018). Halophytes in biosaline agriculture: Mechanism, utilization, and value addition. *Land Degradation & Development*, 29(4), 1081-1095. <https://doi.org/10.1002/ldr.2819>
- Ojeda B., Iñiguez, W., & González, J. (2010). Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático. En Martínez, P., y Patiño, C. (eds.), *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático* (pp. 115-142). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2009). *Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición* (R. Vargas Rojas, trad.) (Proyecto FAOSWALIM, Nairobi, Kenya-Universidad Mayor de San Simón). Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content>



- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2021a). *Global map of salt-affected soils gsmmap v1.0*. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb7247en>
- Ortiz, R. (2008). Crop genetic engineering under global climate change. *Annals of Arid Zone*, 47, 343–354. https://www.researchgate.net/publication/267995855_Crop_Genetic_Engineering_Under_Global_Climate_Change
- Otero, L., Francisco, A., Gálvez, V., Morales, R., Sánchez, I., Labaut, M., & Rivero, L. (2008). *Caracterización y evaluación de la salinidad*. Edit. Richards L.A., México.
- Peña, A., Delgado-Moreno, L. & Rodríguez-Liévana, J. (2020). A review of the impact of wastewater on the fate of pesticides in soils: Effect of some soil and solution properties. *Science of the Total Environment*, 718, 134468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134468>
- Perri, S., Molini, A., Hedin, L. O., & Porporato, A. (2022). Contrasting effects of aridity and seasonality on global salinization. *Nature Geoscience*, 15(5), 375–381. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00931-4>
- Porta, J., Poch, R., & López, M. (2019). *Edafología: uso y protección de suelos*. Mundi-Prensa Libros.
- Pulido Madrigal, L. (2016). Cambio climático, ensalitramiento de suelos y producción agrícola en áreas de riego. *Terra Latinoamericana*, 34(2), 207–218. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000200207&lng=es&tlng=es.
- Qadir, M., Quillerou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R. J., Drechsel, P. & Noble, A.D. (2014). Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum*, 38(4), 282–295. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12054>
- Rekha, P., Gangadharan, R., Pillai, S., Ramanathan, G., & Panigrahi, A. (2012). Hyperspectral image processing to detect the soil salinity in coastal watershed. *2012 Fourth International Conference on Advanced Computing (ICoAC)* (pp. 1-5). doi: 10.1109/ICoAC.2012.6416859.
- Rhoades, J. D. (1990). Overview: diagnosis of salinity problems and selection of control practices. En K. K. Tanji (ed.), *Agricultural salinity assessment and management*. American Society of Civil Engineers, New York. (pp. 18-4171).
- Rosales, F., Pocasangre, L., Trejos, J., Serrano, E., Acuña, O. Segura, ... & Staver, C. (15 a 20 de octubre de 2006). Guía para el diagnóstico de la calidad y la salud de suelos bananeros (Resumen en extenso). *XVII Reunión Internacional de Asociaciones para la Cooperación de investigación sobre banano en el Caribe y América Latina. Brasil*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/profile/Javier-Trejos/>



- publication/228901881_GUIA_PARA_EL_DIAGNOSTICO_DE_LA_CALIDAD_Y_LA_SALUD_DE_SUELOS_BANANEROS_DIAGNOSTIC_GUIDE_FOR_BANANA_SOILS_QUALITY_AND_HEALTH/links/0fcfd5138f93276454000000/GUIA-PARA-EL-DIAGNOSTICO-DE-LA-CALIDAD-Y-LA-SALUD-DE-SUELOS-BANANEROS-DIAGNOSTIC-GUIDE-FOR-BANANA-SOILS-QUALITY-AND-HEALTH.pdf
- Rozema, J. (1996). Biology of halophytes. En C. Redouane, V. Clive & H. Atef (eds). *Halophytes and biosaline agriculture* (pp.17-30). Marcel dekker inc.
- Ruiz Cerda, E., Aldaco Nuncio, R. A., Montemayor Trejo, J. A., Fortis Hernández, M., Olague Ramírez, J., & Villagómez Gamboa, J. C. (2007). Aprovechamiento y mejoramiento de un suelo salino mediante el cultivo de pastos forrajeros. *Técnica Pecuaria en México*, 45(1), 19-24.
- Sahab, S., Suhani, I., Srivastava, V., Chauhan, P. S., Singh, R. P., & Prasad, V. (2021). Potential risk assessment of soil salinity to agroecosystem sustainability: Current status and management strategies. *Science of the Total Environment*, 764, 144164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144164>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección de Geomática (2004). *Degradación del suelo en la República Mexicana - Escala 1:250 000*. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/degra250kgw.html>
- Sheldon, A. R., Dalal, R. C., Kirchoff, G., Kopittke, P. M., & Menzies, N. W. (2017). The effect of salinity on plant-available water. *Plant and Soil*, 418, 477-491.
- Shokri, N., Hassani, A., & Sahimi, M. (2024). Multi-scale soil salinization dynamics from global to pore scale: A review. *Reviews of Geophysics*, 62(4), e2023RG000804. <https://doi.org/10.1029/2023RG000804>
- Vargas, A. (2007). Cambio climático, agua y agricultura. *COMUNICA*, 1(2),13-23. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/7641>
- Wang, J., Ding, J., Yu, D., Teng, D., He, B., Chen, X., & Su, F. (2020). Machine learning-based detection of soil salinity in an arid desert region, Northwest China: a comparison between Landsat-8 oli and sentinel-2 msi. *Science of the total environment*, 707, 136092. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136092>
- Xing, J., Li, X., Li, Z., Wang, X., Hou, N., & Li, D. (2024). Remediation of soda-saline-alkali soil through soil amendments: Microbially mediated carbon and nitrogen cycles and remediation mechanisms. *Science of The Total Environment*, 924, 171641. <https://doi.org/10.1029/2023RG000804>
- Xu, Z., Shao, T., Lv, Z., Yue, Y., Liu, A., Long, X., ... & Rengel, Z. (2020). The mechanisms of improving coastal saline soils by planting rice. *Science of the Total Environment*, 703, 135529. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171641>



- Xu, X., Guo, L., Wang, S., Wang, X., Ren, M., Zhao, P., ... & Lin, A. (2023). Effective strategies for reclamation of saline-alkali soil and response mechanisms of the soil-plant system. *Science of The Total Environment*, 905, 167179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167179>
- Zaman, M., Shahid, S. A., Heng, L., Shahid, S. A., Zaman, M., & Heng, L. (2018). Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. En M. Zaman, S. A. Shahid, & L. Heng (eds.), *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques* (pp. 43-53). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2
- Zhang, W. W., Chong, W. A. N. G., Rui, X. U. E., & Wang, L. J. (2019). Effects of salinity on the soil microbial community and soil fertility. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(6), 1360-1368.
- Zhang, Z., Niu, B., Li, X., Kang, X., & Hu, Z. (2022). Estimation and Dynamic Analysis of Soil Salinity Based on UAV and Sentinel-2A Multispectral Imagery in the Coastal Area, China. *Land*, 11(12), 2307. <https://doi.org/10.3390/land11122307>
- Zhou, D., Lin, Z., Liu, L., & Zimmermann, D. (2013). Assessing secondary soil salinization risk based on the psr sustainability framework. *Journal of Environmental Management*, 128, 642-654. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.025>



Plataformas empleadas en el desarrollo de biosensores y nanobiosensores para la detección de patógenos transmitidos por alimentos y agua

América Selene Gaona Mendoza^{1,2}, Julio Armando Massange Sánchez³ y Luz Edith Casados Vázquez^{1,2,4*}

¹Programa de Posgrado en Biociencias, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato. Campus Irapuato-Salamanca. Irapuato, Guanajuato, 36500, México.

²Departamento de Alimentos, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato. Campus Irapuato-Salamanca. Irapuato, Guanajuato, 36500, México.

³Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ), Guadalajara 44270, México.

⁴CONAHCYT-Universidad de Guanajuato.

*Autor de correspondencia: edith.casados@ugto.mx

Palabras clave:

bacteriófagos, biosensores, BMCC, ETAs, nanobiosensores.

Resumen

Las enfermedades transmitidas por alimentos se desarrollan debido a la contaminación de productos alimenticios con microorganismos patógenos, toxinas u otros contaminantes. Una estrategia para evitar los brotes infecciosos consiste en la detección oportuna de estos contaminantes. Existen diversos métodos para evaluar y asegurar la inocuidad de los alimentos, los métodos convencionales suelen ser lentos y algunos requieren de personal capacitado para poder realizar la detección. Ante esta problemática ha surgido la generación de métodos rápidos e innovadores en los cuales se hace uso de la ingeniería genética para el desarrollo de biosensores, estos pueden utilizar una amplia gama de plataformas para su construcción, entre ellas destacan las células completas, los fagos e inclusive material inerte como nanotubos de diversos materiales. Los biosensores brindan la ventaja de que traducen el reconocimiento del contaminante en una señal visible que facilita la detección y por lo tanto las estrategias de contención.

Introducción

Las enfermedades transmitidas por los alimentos (ETAs) surgen por la presencia de agentes patógenos como virus, parásitos, bacterias, mohos y levaduras o toxinas en los productos alimenticios; estos pueden ser contaminados por diversas vías que pueden ir

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 103-118.
ISSN: 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14708224>

Recibido: 20 septiembre 2024
Revisado: 7 de noviembre 2024
Aceptado: 13 de diciembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



desde la producción hasta el procesamiento y distribución como se muestra en la figura 1 y suelen estar asociadas a síntomas gastrointestinales como diarrea, vómito, dolor abdominal y fiebre. Además, pueden causar otros efectos adversos para la salud humana, como complicaciones neurológicas, hepáticas y renales, y en algunos casos, llegar a ser un problema de mortalidad para personas que pertenecen al grupo de alto riesgo que incluye mujeres embarazadas, neonatos, adultos mayores y personas inmunocomprometidas (Mohammad et al., 2018).

Los patógenos, como bacterias, virus o parásitos son los principales contribuyentes en la aparición de las ETAs; se caracterizan por su dosis mínima necesaria para causar una infección, alta virulencia, amplia accesibilidad y estabilidad en los productos contaminados (Ali et al., 2020). Hablando específicamente de bacterias, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* y los géneros *Salmonella* y *Campylobacter* son los patógenos transmitidos por alimentos de mayor incidencia. Cada año se presentan hasta 60 millones de casos por ETAs, de los cuales en promedio 420,000 terminan en decesos, principalmente en países en vías de desarrollo y situación de extrema pobreza (Foodborne Diseases Estimates, s.f.).

Las ETAs son prevenibles y la detección temprana de estos patógenos es fundamental para evitar la propagación de enfermedades. Por lo tanto, es de vital importancia el desarrollo de nuevos y mejores métodos de detección que cumplan con las siguientes características; rápidos, confiables y de fácil uso. En la actualidad hay diversos métodos de detección, dentro de los cuales, los más asequibles son las técnicas convencionales como el uso de cultivos e identificación mediante pruebas bioquímicas. También están disponibles técnicas de ingeniería genética como la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), que es mucho más sensible, pero requiere de varios pasos adicionales en el procesamiento de la muestra, además de personal calificado (Kabiraz et al., 2023). La biotecnología alimentaria es un campo en creciente desarrollo cuyo objetivo es mejorar la producción, calidad, seguridad y sostenibilidad de los alimentos. Busca soluciones a problemas mediante la mejora e innovación de procesos para hacerlos más rápidos, confiables y fáciles de ejecutar. Un área de particular interés, es la detección de patógenos, en la que el desarrollo de biosensores juega un papel crucial. Estos dispositivos son útiles debido a que nos permiten detectar moléculas de interés nutrimental, moléculas contaminantes como toxinas y metales pesados; y además, una amplia gama de organismos patógenos, entre ellos se pueden mencionar bacterias, virus e incluso parásitos (Ali et al., 2020; Singh et al., 2023; Sa'adon et al., 2024). Por todo lo mencionado, el objetivo de esta revisión es dar un panorama general sobre las plataformas que se emplean en el desarrollo de estos biosensores y nanosensores para la detección de patógenos transmitidos por alimentos y agua.



Figura 1. Principales agentes causantes de Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETAs) y las fuentes más susceptibles a contaminación que les permiten su diseminación
Fuente: Creada con BioRender

¿Qué son los biosensores?

Un biosensor es un dispositivo de diagnóstico que utiliza componentes biológicos de microorganismos, como orgánulos, células completas, enzimas aisladas, anticuerpos o tejidos, acoplados a un elemento transductor. Este transductor genera una señal cuantitativa o cualitativa que es proporcional a la concentración de la molécula o analito objetivo (Hasan et al., 2014).

Para que un biosensor funcione se requieren tres componentes básicos: a) un elemento que efectuará el reconocimiento del analito b) un transductor que se activará en presencia de esta molécula y generará un cambio físico, químico, óptico, térmico o incluso eléctrico, y finalmente c) un detector que permitirá convertir estos cambios en señales que son fáciles de interpretar (Valenzuela-Amaro et al., 2023). En resumen, un biosensor es un dispositivo que cuenta con un elemento biológico, que le permite detectar biomarcadores específicos de los patógenos, utilizando señales cuantificables y detectables con las que se puede correlacionar la presencia de patógeno (Fracchiolla et al., 2013; Hegde et al., 2022).

Para el desarrollo de biosensores se emplean diversas plataformas que servirán como “chasis” para contener al elemento receptor, estos pueden ser elementos complejos como por ejemplo: bacterias y células eucariotas modificadas genéticamente para reconocer al analito en cuestión; se han utilizado de igual manera virus que han sido diseñados usando herramientas de ingeniería genética; e incluso se



pueden utilizar matrices inertes como es el caso de los nanobiosensores que utilizan nanomateriales para la fijación del elemento de reconocimiento. Una vez que la plataforma ha detectado al analito para el cual fue diseñada se genera una señal de salida que nos indica que el analito está presente en la muestra; esta señal de salida debe ser medible u observable y depende de la naturaleza del diseño del biosensor, podemos observar señales electroquímicas, piezo-eléctricas u ópticas (Figura 2).

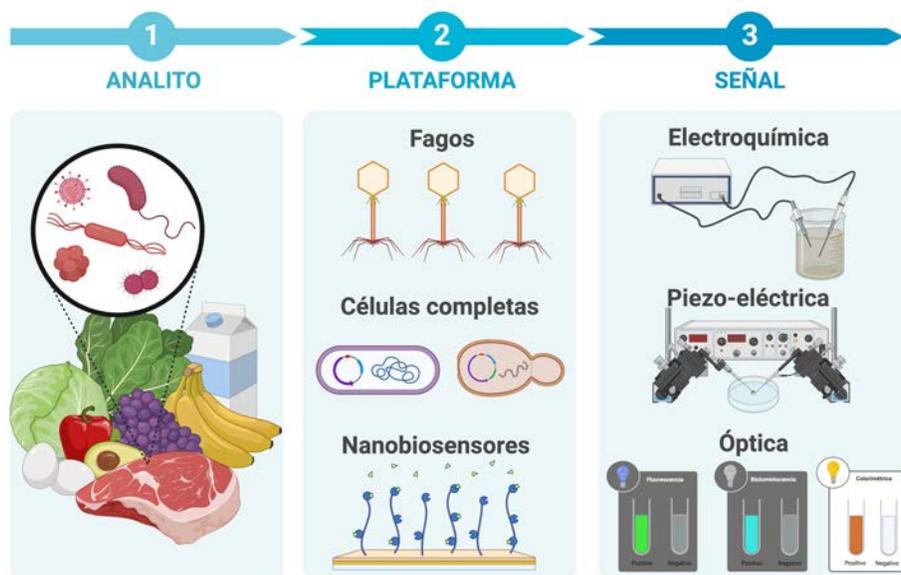


Figura 2. Estrategias de detección de contaminantes en alimentos utilizando diferentes plataformas biosensoras
Fuente: Creada con BioRender

Biosensores microbianos de células completas (BMCC)

Como su nombre lo dice, los BMCC utilizan células completas de origen procariota y eucariota como chasis para contener a los circuitos genéticos necesarios para que se efectúe el reconocimiento y la transducción de la señal. Estos circuitos consisten en el ensamble de diversas piezas como genes de receptores, reporteros, promotores, terminadores, etc., que conforman al elemento de reconocimiento y de transducción.

Generalmente, para el diseño de estos biosensores se aprovecha la capacidad natural de los microorganismos patógenos para detectar la presencia de moléculas propias en el ambiente y a través de técnicas moleculares se mimetiza esta capacidad de detección en la célula que será el chasis del biosensor. Por ejemplo, podemos mencionar el caso de la detección de la población bacteriana, mejor conocido como *quórum sensing* bacteriano (QS). Este es un sistema de comunicación celular que se basa en la detección de moléculas autoinductoras (AI) por parte de la comunidad



bacteriana. La detección en sistemas de QS se realiza mediante un sistema de dos componentes que consta de un receptor de membrana que reconoce la molécula AI. Una vez detectada, el receptor se activa y fosforila a un regulador transcripcional específico, que regula la transcripción de un gen blanco. En el diseño de los biosensores, este gen puede ser reemplazado por un gen reportero. Este sistema de dos componentes es un candidato ideal como elemento de reconocimiento debido a su especificidad y su capacidad para desencadenar una reacción que permite visualizar la presencia del patógeno como se observa en la figura 3.

El diseño de estos biosensores ha permitido la detección de moléculas de señalización de grampositivas como el autoinductor AIP-I de *S. aureus* (Lubkowitz et al., 2018) y de gramnegativas moléculas de acil-homoserina lactona (AHLs) de *P. aeruginosa* y *B. pseudomallei* (Wu et al., 2021) (Tabla 1).

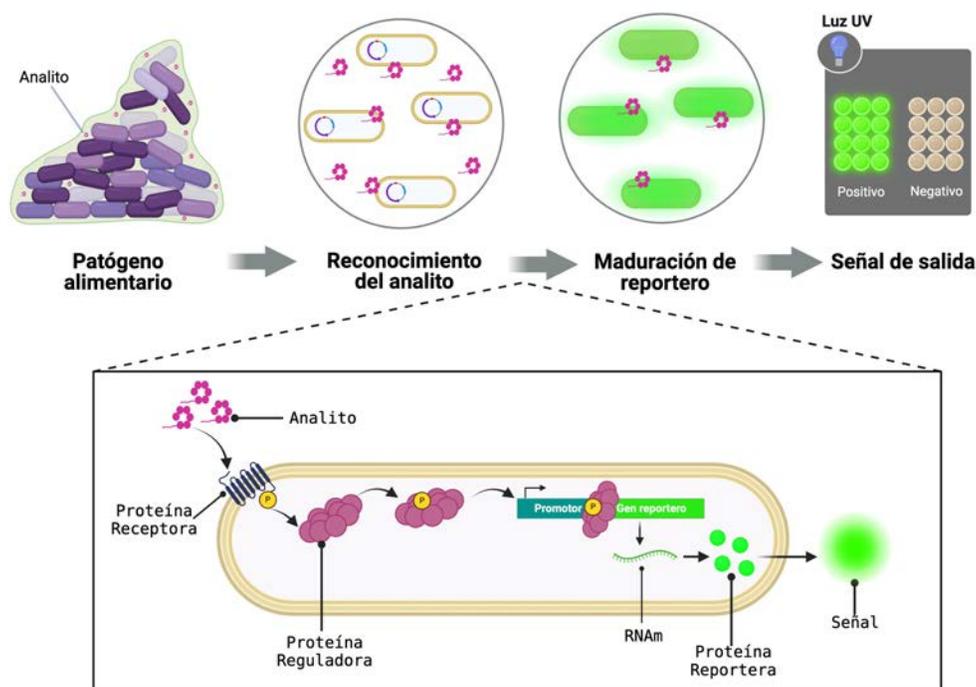


Figura 3. Mecanismo de detección basados en el sistema de quorum sensing para la generación de biosensores microbianos de células completas (BMCC)

Fuente: Creada con BioRender

Ventajas de los BMCC

Debido a que se trata de organismos vivos, la vida útil de los BMCC puede ser limitada, siendo de días a meses; no obstante, el uso de hospederos formadores de esporas como *Bacillus subtilis* puede extender la durabilidad del biosensor hasta por 1 año (Sangal et al., 2011). Estrategias como la encapsulación, liofilización e



inmovilización de las células permiten su conservación y transporte hasta su uso. Aunado a ello la encapsulación permite una fácil manipulación y almacenamiento de las células biosensoras, mientras que la liofilización permite su adhesión en tiras de papel o membranas para la preparación de tiras reactivas de uso rápido y sencillo, sin la necesidad de requerir personal altamente capacitado para su uso. Por otra parte, al tratarse de células bacterianas en su mayoría, los requerimientos para su crecimiento son bajos, mismos que se ven reflejados en la parte económica por lo que pueden considerarse herramientas accesibles.

Bacteriófagos

Los biosensores que emplean bacteriófagos como plataformas aprovechan la capacidad natural de estos virus para infectar específicamente a una bacteria. Existe una gran diversidad de fagos, aunque para el desarrollo de biosensores se utilizan principalmente los bacteriófagos líticos y templados (Al-Hindi et al., 2022).

¿Cómo funcionan los biosensores basados en fagos?

A diferencia de los BMCC, que requieren un elemento de reconocimiento, los biosensores que utilizan fagos se valen de la capacidad y especificidad de estos para infectar al patógeno de manera selectiva. Por medio de las herramientas moleculares se inserta en el bacteriófago un biomarcador que será el que nos genere una señal de salida, señal que se puede ver solo si el bacteriófago infecta al patógeno para el cual es específico. Algunos de los biomarcadores se basan en reacciones catalíticas, por ejemplo, el uso de la β -D-galactosidasa que posterior a su liberación y al añadir p-aminofenil- β -D-galactopiranosido como sustrato se obtiene p-aminofenol, cuya oxidación genera una señal electroquímica como respuesta, lo que ha permitido la detección de patógenos como *Bacillus cereus*, *Mycobacterium smegmatis* y *E. coli* en alimentos y agua (Neufeld et al., 2003; Yemini et al., 2007; Hinkley et al., 2018).

Otros biomarcadores que resaltan son el trifosfato de adenosina (ATP) y la adenilato-kinasa (AK) que pueden utilizarse en ensayos de bioluminiscencia, pues su liberación impulsa la reacción catalítica de la enzima luciferasa (Brovko et al., 2012), generando una señal de salida de tipo óptica para la detección de *Salmonella*, *L. monocytogenes*, *E. coli* O157 (Wu & Griffiths, 2001). En particular, el gen que codifica para la enzima luciferasa, es uno de los biomarcadores de mayor interés para crear reacciones de bioluminiscencia; gracias a la inserción de este gen mediante ingeniería genética y posterior expresión en fagos reporteros, se facilita la conversión del sustrato cromogénico que genera una señal óptica fácilmente detectable.

A la actualidad, se han desarrollado una diversidad de fagos que permiten detectar bacterias como *E. coli* (Zurier et al., 2020) o *Listeria monocytogenes* (Meile et al., 2020) en concentraciones muy pequeñas, incluso hasta una sola célula (Tabla 1). En la Figura 4 se detalla el uso del fago A500: *nluc* Δ LCR como biosensor para la detección de *Listeria monocytogenes*; en un primer paso se lleva a cabo el muestreo del alimento contaminado, posteriormente se lleva a cabo un proceso de enriquecimiento en medio de cultivo selectivo para permitir el crecimiento del patógeno y con ello la infección por fagos. Una vez que el fago se replica en el huésped y comienza la lisis celular y síntesis de la enzima luciferasa (NLuc), se adiciona el sustrato para la generación de bioluminiscencia. Este método permitió detectar una UFC (unidad formadora de colonias) de *L. monocytogenes* en 25 g de leche, embutidos y lechuga en menos de 24 h (Meile et al., 2020).

Además de las reacciones enzimáticas, se han utilizado otras formas de detección con estas plataformas, como el cambio en la conductividad (impedancia) del medio de crecimiento del patógeno (Falahee et al., 2003) e incluso proteínas asociadas a fagos (RBP) responsables de reconocer receptores específicos de las bacterias huésped (He et al., 2018; Kunstmann et al., 2018).

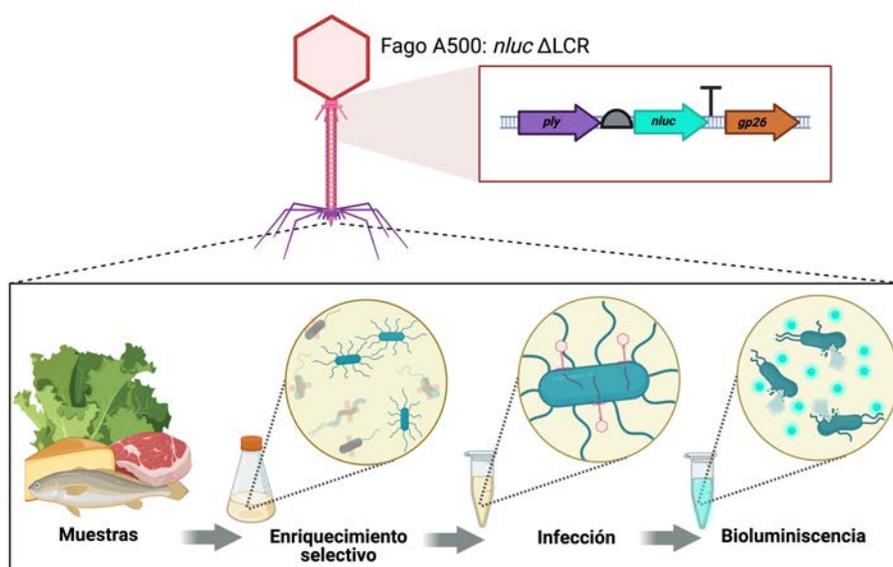


Figura 4. Detección de *Listeria monocytogenes* en alimentos mediante fagos A500 modificados con un reportero basado en bioluminiscencia
Fuente: Tomado de Meile et al., 2020 con modificaciones

Ventajas de los fagos

Una de las principales ventajas de los fagos como método de detección es su alta especificidad hacia una bacteria huésped, por lo que además son seguros de usar



ya que no infectan humanos. A diferencia de las técnicas de biología molecular, como la PCR, los fagos permiten diferenciar entre células vivas y muertas puesto que los fagos solo se replican en las bacterias vivas (Qian et al., 2017). El tiempo es un factor importante que se considera al seleccionar un método de detección, en el caso de los fagos virulentos el tiempo para completar el ciclo de infección ocurre entre 1 y 2 h post-infección por lo que la liberación del biomarcador en el huésped infectado es rápida, lo que acelera el proceso de detección en comparación con otros métodos. Por su parte, ventajas como la estabilidad ante diversas condiciones ambientales como altas temperaturas, variaciones de pH y la resistencia a solventes orgánicos (Xu et al., 2019), hace de los fagos un método de detección interesante. Finalmente, su producción a gran escala se considera viable debido a su simpleza y costos bajos, (Bárdy et al., 2016).

Nanobiosensores

Un nanobiosensor se caracteriza por incorporar nanomateriales para la fabricación del elemento transductor, lo que permite detectar patógenos y sus biomoléculas en una escala extremadamente pequeña ya que convierten una interacción biomolecular en señales detectables, que van desde cambios en la concentración de protones, emisiones de calor o alteraciones en propiedades de la luz, como la fluorescencia o la absorbancia generando señales electroquímicas, ópticas o magnéticas (Saha et al., 2012; Valenzuela-Amaro et al., 2023).

¿Qué son los nanobiosensores y cómo funcionan?

Los nanobiosensores deben su nombre a la utilización de nanomateriales, que son la clave de la sensibilidad y especificidad de estos biosensores. Entre los materiales más utilizados se encuentran las nanopartículas de oro metálico, óxido de hierro, puntos cuánticos, óxido de grafeno y nanotubos de carbono (Srivastava et al., 2018; Ansari & Malhotra, 2022); han demostrado ser excelentes plataformas para el transporte de elementos de bioconocimiento, tales como enzimas, anticuerpos, moléculas de DNA, aptámeros o polímeros de impresión molecular, que son esenciales para detectar y unirse específicamente a microorganismos y sus biomoléculas (Guruprasath et al., 2024). Un aspecto fundamental en el diseño de los nanobiosensores es la biofuncionalización de la nanoestructura generada con el agente de reconocimiento sin alterar su actividad (Valenzuela-Amaro et al., 2023). El diseño de un nanobiosensor se basa en el uso de materiales a escala nanométrica como nanotubos magnéticos, metálicos, de óxido de grafeno, de carbono y puntos cuánticos acoplados a componentes biológicos como enzimas, DNA, anticuerpos,

aptámeros, entre otros. Este acoplamiento permite la detección del analito que por medio de un transductor generará una señal visible como se muestra en la Figura 5.

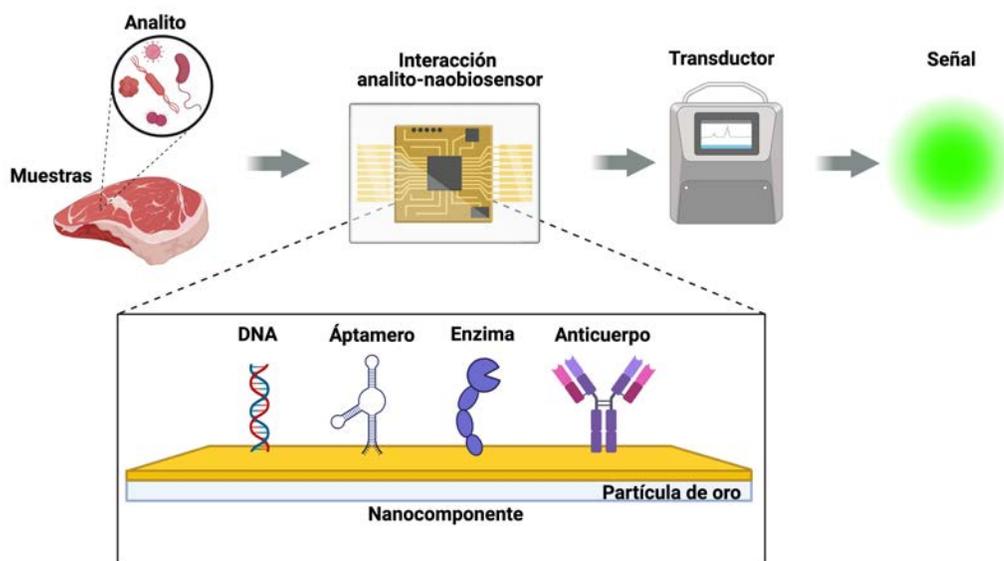


Figura 5. Los nanobiosensores como plataformas de detección de patógenos alimentarios
Fuente: Creada con BioRender

Los nanobiosensores son de gran interés en la industria alimentaria debido a su versatilidad. En general, se ha logrado la detección de patógenos como *Campylobacter jejuni*, contaminante de carne de pollo y agua de consumo no tratada, (McVey et al., 2017) y *Salmonella enterica* Typhimurium, patógeno presente en huevo, carne cruda y leche, esto mediante la funcionalización de nanopartículas de oro con anticuerpos (Guo et al., 2020) o nanopartículas de plata con moléculas de DNA, respectivamente (Leng et al., 2018). Otra aplicación interesante es el uso de estas plataformas en combinación con aptámeros, es decir pequeñas moléculas de DNA o RNA que pueden unirse específicamente a una molécula objetivo, técnicas que se han empleado en la detección de *Staphylococcus aureus* al utilizar un aptasensor modificado con nanopartículas de óxido de hierro (Fe_3O_4) y puntos de carbono modificados (Cui et al., 2019) (Tabla 1).

Ventajas de los nanobiosensores

El integrar nanomateriales en los biosensores mejora la sensibilidad del dispositivo y por lo tanto el control de la seguridad alimentaria, incluso durante la etapa de envasado (Thakur et al., 2022). Características como velocidad y especificidad de detección ha hecho que los nanosensores reemplacen a los métodos tradicionales ya que además de detectar bajas concentraciones del patógeno, presenta un mínimo de falsos positivos o negativos. Además, son considerados como una tecnología portátil que facilita el monitoreo *in situ*,



es decir en tiempo real en el alimento e instalaciones (Davidescu et al., 2024). Otra ventaja de estos dispositivos es la capacidad de desarrollar plataformas multiplexadas capaces de detectar varios patógenos en un solo ensayo (Fathi et al., 2012; Lotfi-Attari et al., 2017). Aunado a ello, el diseño de nanobiosensores de un solo uso, es decir, desechables evita la contaminación de los sistemas de detección (Bhalla et al., 2020).

Tabla 1. Plataformas empleadas para el diseño de biosensores y nanobiosensores usados en la detección de bacterias patógenas

Plataforma empleada	Patógeno a detectar	Señal de salida	Sensibilidad	Tiempo de detección	Fuente
Células enteras de <i>Lactobacillus reuteri</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>	Colorimétrica	Detección de AIP de 10^{-9} a 10^{-7} M.	3 h	(Lubkowitz, et al., 2018)
Células enteras de <i>Escherichia coli</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Burkholderia pseudomallei</i>	Fluorescencia	Detección de AHL de 10^{-8} a 10^{-7} M.	6 a 8 h	(Wu et al, 2021)
Fago λ vir	<i>E. coli</i> MG1655	Electroquímica	Detección de 1 a 10^5 UFC/mL.	6 a 8 h	(Neufeld, et al., 2003)
Fago B1-7064	<i>Bacillus cereus</i>	Amperométrica	Detección de 10 a 10^2 células viables/mL.	8 h	(Yemini et al., 2007)
Fago D29	<i>Mycobacterium smegmatis</i>	Amperométrica	Detección de 10 a 10^2 células viables/mL.	8 h	(Yemini et al., 2007)
Fago T7	<i>E. coli</i>	Luminiscencia	Detección de 10 a 80 UFC/100 mL.	10 h	(Hinkley, et al., 2018)
Fago A500	<i>Listeria monocytogenes</i>	Luminiscencia	Detección de 1 a 10^7 UFC/25 g.	19 h	(Meile, et al., 2020)
Nanopartículas de oro	<i>Campylobacter jejuni</i>	Colorimétrica	Detección de 10^{-9} a 10^{-6} μ M de DNA.	3 h	(McVey et al., 2017)
Nanobarras de oro	<i>Salmonella enterica</i> serovar Thyphimorium	Colorimétrica	Detección de 10^1 a 10^5 UFC/mL.	3 h	(Guo, et al., 2020)
Nanoclusters de plata	<i>S. Thyphimorium</i>	Fluorescencia	Detección de 10 a 5^{10} UFC/mL.	2 h	(Leng, et al., 2018)
Puntos de carbono	<i>S. aureus</i>	Fluorescencia	Detección de 8 a 10^7 UFC/mL.	30 min	(Cui, et al., 2019)

AIP: Péptido Autoinductor Activo. **AHL:** Acil Homoserina Lactona. **UFC:** Unidad Formadora de Colonia.

Desafíos, limitaciones y perspectivas

El uso de biosensores como métodos de detección en la industria alimentaria ha sido de gran interés por la plétora de moléculas que se pueden detectar; sin embargo, la estandarización y validación de un protocolo de ensayo puede verse limitado por las regulaciones de seguridad alimentaria actuales (Davidescu et al., 2024).

Algunas implicaciones que limitan el uso de plataformas como los nanobiosensores en la industria alimentaria son la estabilidad del dispositivo ante cambios ambientales como temperatura, pH y humedad. Se debe considerar que dependiendo del tipo de alimento la variación en las condiciones mencionadas puede ser impor-



tante. Se han reportado dificultades en la detección de contaminantes o adulterantes en niveles muy bajos en matrices complejas (Kumar et al., 2017).

Con respecto a los biosensores derivados de bacteriófagos que muestran un alto grado de especificidad, se debe mencionar que una de sus limitaciones es debido a que son dispositivos que requieren un alto nivel de conocimientos tecnológicos para su desarrollo y manipulación.

Las perspectivas del uso de biosensores y nanobiosensores en la industria alimentaria son amplias y prometedoras, ya que su implementación puede abordar varios retos actuales y futuros relacionados con la calidad, seguridad y sostenibilidad. El desarrollo de estos dispositivos nos ayudaría a realizar detecciones en tiempo real lo que llevaría a un aseguramiento de la calidad que rendiría en la disminución de costos operativos y de producción (Singh et al., 2023).

Conclusiones

Los biosensores son dispositivos que han permitido garantizar la seguridad y calidad de alimentos crudos y procesados, así como del agua para consumo humano al detectar de manera rápida y confiable a patógenos como virus, bacterias o parásitos, responsables de las enfermedades transmitidas por los alimentos (ETAs). Por lo que la utilización de este tipo de herramientas ha ido reemplazando el uso de tecnologías convencionales debido a las ventajas que estos presentan y a la versatilidad de los elementos biológicos y materiales que pueden utilizarse para su diseño. Siendo una parte importante la selección de la plataforma en que se quiere diseñar el biosensor, pues de ello dependerá en gran medida la sensibilidad y especificidad del dispositivo. El aprovechamiento de células completas procarionas y eucariotas e incluso bacteriófagos y el acoplamiento de materiales a escala nanométrica han permitido generar biosensores con características específicas, lo cual contribuye a la generación de un sistema alimentario más seguro y sostenible.

Las implicaciones sociales alrededor de la generación y uso de los biosensores y nanobiosensores son diversas. Entre las más destacadas se encuentra su aplicación en el monitoreo de la calidad e inocuidad de los alimentos, lo que repercute directamente sobre la salud y de esta manera se promueve el desarrollo de una sociedad más saludable, estos dispositivos pueden contribuir indirectamente a la reducción de los costos del sistema de salud pública, al disminuir la incidencia de enfermedades gastrointestinales y sus posibles complicaciones.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.



Financiamiento

Esta investigación fue apoyada por el CIIC 2023 bajo el número de proyecto 021/2023 y por Ciencia de Frontera 2023 del CONAHCyT con el número de proyecto CF-2023-I-1758.

Referencias

- Al-Hindi, R. R., Teklemariam, A. D., Alharbi, M. G., Alotibi, I., Azhari, S. A., Qadri, I., & Bhunia, A. K. (2022). Bacteriophage-based biosensors: A platform for detection of foodborne bacterial pathogens from food and environment. *Biosensors*, *12*(10), 905. <https://doi.org/10.3390/bios12100905>
- Ali, A. A., Altemimi, A. B., Alhelfi, N., & Ibrahim, S. A. (2020). Application of biosensors for detection of pathogenic food bacteria: a review. *Biosensors*, *10*(6), 58. Retrieved from Biosensors. <https://doi.org/10.3390/bios10060058>
- Ansari, A. A., & Malhotra, B. D. (2022). Current progress in organic–inorganic hetero-nano-interfaces based electrochemical biosensors for healthcare monitoring. *Coordination Chemistry Reviews*, *452*, 214282. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214282>
- Bhalla, N., Pan, Y., Yang, Z., & Payam, A. F. (2020). Opportunities and challenges for biosensors and nanoscale analytical tools for pandemics: COVID-19. *ACS nano*, *14*(7), 7783-7807. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04421>
- Bárdy, P., Pantůček, R., Benešik, M., & Doškař, J. (2016). Genetically modified bacteriophages in applied microbiology. *Journal of Applied Microbiology*, *121*(3), 618-633. <https://doi.org/10.1111/jam.13207>
- Brovko, L. Y., Anany, H., & Griffiths, M. W. (2012). Bacteriophages for detection and control of bacterial pathogens in food and food-processing environment. *Advances in food and nutrition research*, *67*, 241-288. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394598-3.00006-X>
- Cui, F., Sun, J., de Dieu Habimana, J., Yang, X., Ji, J., Zhang, Y. & Sun, X. (2019). Ultrasensitive fluorometric angling determination of *Staphylococcus aureus* *in vitro* and fluorescence imaging *in vivo* using carbon dots with full-color emission. *Analytical chemistry*, *91*(22), 14681-14690. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b03916>
- Davidescu, M. A., Panzaru, C. C., Simeanu, C., Simeanu, D., Dolis, M., Madescu, B., & Usturoi, A. (2024). Exploring Nanobiotechnologies in the Food Industry: Applications, Benefits and Challenges. *Scientific papers animal science and biotechnologies*, *57*(1), 63-63. Recuperado de https://spasb.ro/index.php/public_html/article/view/2226/2119



- Falahee, M. B., Park, S. F., & Adams, M. R. (2003). Detection and enumeration of *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli* by indirect impedimetry with an oxygen scavenging system. *Journal of food protection*, 66(9), 1724-1726. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-66.9.1724>
- Fathi, M., Mozafari, M. R., & Mohebbi, M. (2012). Nanoencapsulation of food ingredients using lipid based delivery systems. *Trends in food science & technology*, 23(1), 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.08.003>
- World Health Organization. (s.f.). *Foodborne Diseases Estimates*. Recuperado el septiembre de 2024. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/who-estimates-of-the-global-burden-of-foodborne-diseases>
- Fracchiolla, N. S., Artuso, S., & Cortelezzi, A. (2013). Biosensors in clinical practice: focus on oncohematology. *Sensors*, 13(5), 6423-6447. <https://doi.org/10.3390/s130506423>
- Fuertes, G., Soto, I., Carrasco, R., Vargas, M., Sabattin, J., & Lagos, C. (2016). Intelligent packaging systems: Sensors and nanosensors to monitor food quality and safety. *Journal of Sensors*, 2016(1), 4046061. <https://doi.org/10.1155/2016/4046061>
- Guo, R., Huang, F., Cai, G., Zheng, L., Xue, L., Li, X. & Lin, J. (2020). A colorimetric immunosensor for determination of foodborne bacteria using rotating immunomagnetic separation, gold nanorod indication, and click chemistry amplification. *Microchimica Acta*, 187, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s00604-020-4169-z>
- Guruprasath, N., Sankarganesh, P., Adeyeye, S. A., Babu, A. S., & Parthasarathy, V. (2024). Review on emerging applications of nanobiosensor in food safety. *Journal of Food Science*, 89(7), 3950-3972. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17149>
- Hasan, A., Nurunnabi, M., Morshed, M., Paul, A., Polini, A., Kuila, T., Al, M., Lee, Y., & Jaffa, A. (2014). Recent advances in application of biosensors in tissue engineering. *Biomed research international*, 2014, 307519. <https://doi.org/10.1155/2014/307519>
- He, Y., Shi, Y., Liu, M., Wang, Y., Wang, L., Lu, S., & Fu, Z. (2018). Nonlytic recombinant phage tail fiber protein for specific recognition of *Pseudomonas aeruginosa*. *Analytical chemistry*, 90(24), 14462-14468. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b04160>
- Hegde, M., Pai, P., Shetty, M. G., & Babitha, K. S. (2022). Gold nanoparticle based biosensors for rapid pathogen detection: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18, 100756. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100756>



- Hinkley, T. C., Singh, S., Garing, S., Le Ny, A. L., Nichols, K. P., Peters, J. E., Talbert, J.N. & Nugen, S. R. (2018). A phage-based assay for the rapid, quantitative, and single CFU visualization of *E. coli* (ECOR# 13) in drinking water. *Scientific reports*, 8(1), 14630. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33097-4>
- Kabiraz, M. P., Majumdar, P. R., Mahmud, M. C., Bhowmik, S., & Ali, A. (2023). Conventional and advanced detection techniques of foodborne pathogens: A comprehensive review. *Heliyon*, 9(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15482>
- Kumar, V., Guleria, P., & Mehta, S. K. (2017). Nanosensors for food quality and safety assessment. *Environmental Chemistry Letters*, 15, 165-177. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0616-4>
- Kunstmann, S., Scheidt, T., Buchwald, S., Helm, A., Mulard, L. A., Fruth, A., & Barbirz, S. (2018). Bacteriophage Sf6 tailspike protein for detection of Shigella flexneri pathogens. *Viruses*, 10(8), 431. <https://doi.org/10.3390/v10080431>
- Leng, X., Wang, Y., Li, R., Liu, S., Yao, J., Pei, Q., & Huang, J. (2018). Circular exponential amplification of photoinduced electron transfer using hairpin probes, G-quadruplex DNAzyme and silver nanocluster-labeled DNA for ultrasensitive fluorometric determination of pathogenic bacteria. *Microchimica Acta*, 185, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s00604-018-2698-5>
- Lotfi-Attari, J., Pilehvar-Soltanahmadi, Y., Dadashpour, M., Alipour, S., Farajzadeh, R., Javidfar, S., & Zarghami, N. (2017). Co-delivery of curcumin and chrysin by polymeric nanoparticles inhibit synergistically growth and hTERT gene expression in human colorectal cancer cells. *Nutrition and cancer*, 69(8), 1290-1299. <https://doi.org/10.1080/01635581.2017.1367932>
- Lubkowitz, D., Ho, C. L., Hwang, I. Y., Yew, W. S., Lee, Y. S., & Chang, M. W. (2018). Reprogramming probiotic Lactobacillus reuteri as a biosensor for Staphylococcus aureus derived AIP-I detection. *ACS Synthetic Biology*, 7(5), 1229-1237. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.8b00063>
- McVey, C., Huang, F., Elliott, C., & Cao, C. (2017). Endonuclease controlled aggregation of gold nanoparticles for the ultrasensitive detection of pathogenic bacterial DNA. *Biosensors and Bioelectronics*, 92, 502-508. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.10.072>
- Meile, S., Sarbach, A., Du, J., Schuppler, M., Saez, C., Loessner, M. J., & Kilcher, S. (2020). Engineered reporter phages for rapid bioluminescence-based detection and differentiation of viable Listeria cells. *Applied and environmental microbiology*, 86(11), e00442-20. <https://doi.org/10.1128/AEM.00442-20>
- Mohammad, A. M., Chowdhury, T., Biswas, B., & Absar, N. (2018). Food poisoning and intoxication: A global leading concern for human health. *En A. M.*



- Grumezescu, & A. M. Holban, *Food Safety and Preservation* (págs. 307-352). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814956-0.00011-1>
- Neethirajan, S., & Jayas, D. S. (2011). Nanotechnology for the food and bioprocessing industries. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 39–47. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0328-2>
- Neufeld, T., Schwartz-Mittelmann, A., Biran, D., Ron, E. Z., & Rishpon, J. (2003). Combined phage typing and amperometric detection of released enzymatic activity for the specific identification and quantification of bacteria. *Analytical chemistry*, 75(3), 580-585. <https://doi.org/10.1021/ac026083e>
- Qian, Y., Fan, T., Wang, P., Zhang, X., Luo, J., Zhou, F., Yao, Y., Liao, X., Li, Y. & Gao, F. (2017). A novel label-free homogeneous electrochemical immunosensor based on proximity hybridization-triggered isothermal exponential amplification induced G-quadruplex formation. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 248, 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.03.152>
- Sa'adon, S. A., Jasni, N. H., Hamzah, H. H., & Othman, N. (2024). Electrochemical biosensors for the detection of protozoan parasite: a scoping review. *Pathogens and Global Health*, 118(6), 459-470. doi: 10.1080/20477724.2024.2381402
- Saha, K., Agasti, S. S., Kim, C., Li, X., & Rotello, V. M. (2012). Gold nanoparticles in chemical and biological sensing. *Chemical reviews*, 112(5), 2739-2779. <https://doi.org/10.1021/cr2001178>
- Sangal, A., Pasini, P., & Daunert, S. (2011). Stability of spore-based biosensing systems under extreme conditions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 158(1), 377-382. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.06.039>
- Singh, P., Pandey, V. K., Srivastava, S., & Singh, R. (2023). A systematic review on recent trends and perspectives of biosensors in food industries. *Journal of Food Safety*, 43(5), e13071. <https://doi.org/10.1111/jfs.13071>
- Srivastava, A. K., Dev, A., & Karmakar, S. (2018). Nanosensors and nanobiosensors in food and agriculture. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 161-182. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0674-7>
- Thakur, M., Wang, B., & Verma, M. L. (2022). Development and applications of nanobiosensors for sustainable agricultural and food industries: Recent developments, challenges and perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102371. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102371>
- Valenzuela-Amaro, H. M., Aguayo-Acosta, A., Meléndez-Sánchez, E. R., de la Rosa, O., Vázquez-Ortega, P. G., Oyervides-Muñoz, M. A., Sosa-Hernández, J.E. & Parra-Saldívar, R. (2023). Emerging applications of nanobiosensors in



- pathogen detection in water and food. *Biosensors*, 13(10), 922. <https://doi.org/10.3390/bios13100922>
- Wang, J., Kanach, A., Han, R., & Applegate, B. (2021). Application of bacteriophage in rapid detection of *Escherichia coli* in foods. *Current Opinion in Food Science*, 39, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.12.015>
- Wu, Y. B., & Griffiths, M. W. (2001). Influence of phage population on the phage-mediated bioluminescent adenylate kinase (AK) assay for detection of bacteria. *Letters in applied microbiology*, 33(4), 311-315. <https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.2001.01002.x>
- Wu, Y., Wang, C. W., Wang, D., & Wei, N. (2021). A whole-cell biosensor for point-of-care detection of waterborne bacterial pathogens. *ACS synthetic biology*, 10(2), 333-344. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.0c00491>
- Xu, J., Chau, Y., & Lee, Y. K. (2019). Phage-based electrochemical sensors: A review. *Micromachines*, 10(12), 855. <https://doi.org/10.3390/mi10120855>
- Yemini, M., Levi, Y., Yagil, E., & Rishpon, J. (2007). Specific electrochemical phage sensing for *Bacillus cereus* and *Mycobacterium smegmatis*. *Bioelectrochemistry*, 70(1), 180-184. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2006.03.014>
- Zurier, H. S., Duong, M. M., Goddard, J. M., & Nugen, S. R. (2020). Engineering biorthogonal phage-based nanobots for ultrasensitive, *in situ* bacteria detection. *ACS applied bio materials*, 3(9), 5824-5831. <https://doi.org/10.1021/acsabm.0c00546>

Inmunoterapias y virus oncolíticos: perspectiva en cáncer de próstata

Mariana Bereth Minor-Pérez¹ y Sara Elisa Herrera-Rodríguez^{1*}

¹Subsede Sureste, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Tablaje Catastral 31264 Km 5.5 Carretera Sierra Papacal-Chuburná Puerto Parque Científico Tecnológico de Yucatán. Mérida, Yucatán, 97302, México.

*Autor de correspondencia: sherrera@ciatej.mx

Palabras clave:

cáncer, inmunoterapia, microambiente tumoral, sistema inmune, terapias.

Resumen

En México, el cáncer de próstata ocupa el primer lugar en incidencias en hombres, y el quinto como causa de muerte por cáncer. A nivel mundial, ocupa el cuarto lugar en incidencias y el octavo en mortalidad. Su tratamiento a largo plazo es complicado debido a la progresión a cáncer de próstata metastático resistente a la castración que suele ocurrir aún tras la terapia inicial de privación de andrógenos, y la baja supervivencia de los pacientes, sobre todo cuando la detección se da en etapas tardías. El desarrollo de inmunoterapias ha permitido mejorar la calidad de vida de los pacientes al plantear variadas rutas de tratamientos, que van desde la aplicación de fármacos especializados, a la inducción de cierta respuesta inmune por el mismo paciente, generando terapias más eficientes y con efectos secundarios más leves. En el presente trabajo se describe el funcionamiento general de algunas inmunoterapias vigentes y se ofrece una perspectiva hacia la introducción de los virus oncolíticos como un auxiliar o alternativa para estas.

Introducción

El cáncer de próstata es el crecimiento descontrolado de células malignas de la próstata (Instituto de Salud para el Bienestar, 2022) y en su aparición influyen diversos factores como la edad, genética, ciertos estilos de vida y la ascendencia. Mundialmente, el cáncer de próstata es el cuarto en incidencia y la octava causa de muerte por cáncer. En el año 2022, en México la incidencia fue de 18,197 casos, causó 2670 muertes (Cancer Today, s. f.) y según un estudio realizado por el Instituto Nacional de Salud Pública de 1980 al 2013, en este periodo fallecieron 114,616 hombres

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 119-132.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14708284>

Recibido: 04 de octubre 2024
Revisado: 20 de noviembre 2024
Aceptado: 15 de diciembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



con edad promedio de 76.5 años, por esta enfermedad, con un crecimiento anual sostenido del 2.3% que varía según el grado de marginación estatal (Mortalidad por cáncer de próstata en México a lo largo de tres décadas, 2020) De acuerdo con la segunda edición (2023) del Protocolo de Atención Integral del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), en el en el tercer nivel de atención a pacientes de cáncer de próstata los tratamientos son variados y dependen del grupo de riesgo; la vigilancia activa (riesgo bajo o muy bajo), la prostatectomía radical con o sin linfadenectomía (riesgo alto, muy alto y localmente avanzado) y radioterapia (riesgo bajo y muy bajo); adicionalmente, se describen diversos fármacos como tratamiento sistémico para el CaP en sus distintas etapas, como la Abiraterona, Denosumab, o Ketoconazol. Estos tratamientos pueden ser empleados al mismo tiempo que con Terapia de Bloqueo androgénico Total (BAT) y docetaxel. El BAT es una terapia basada en la acción sobre el receptor de andrógenos, administrando medicamentos con efecto antiandrógeno o bien la extirpación de los tejidos (testículos); se usa comúnmente como acompañamiento a la radioterapia tras la prostatectomía, o como una terapia en sí misma cuando el cáncer ya no responde a la cirugía o radiación, si existe riesgo de recurrencia, o la sobrevida del paciente no supera los 5 años. También se emplea cuando el cáncer localizado ha desarrollado resistencia a la castración, con el objetivo de mantener bajos los niveles de testosterona; sin embargo, la principal desventaja del BAT es su influencia sobre los niveles de hormonas, que puede llegar a tener efectos importantes en el paciente y que, eventualmente, cualquier cáncer de próstata se volverá resistente y la prognosis no es buena, aun cuando los niveles de testosterona estén muy bajos, semejante a un nivel de castración (Téllez-Bañuelos et al., 2023). Todo lo anterior hace que la terapia tradicional del cáncer de próstata sea muy compleja y dependiente de una supervisión constante del cáncer y su progresión. A pesar de que existen algunos estudios para intentar determinar la relación entre mortalidad e incidencia del cáncer de próstata (Gupta & Shukla, 2022; Joniau et al., 2013; Luisa, 2023; Silberstein et al., 2013), la información aún no es suficiente para poder determinar qué terapia, conjunto de ellas o si la cirugía tiene un mejor efecto en la supervivencia general de los pacientes (Silberstein et al., 2013). En general, es muy complicado predecir la respuesta que tendrá cada paciente al tratamiento, esto probablemente a causa de las variables que cambian entre individuos, tipo y etapa del cáncer, y los mecanismos de inmunosupresión propios de cada enfermedad (Gupta & Shukla, 2022).

El defecto de terapias convencionales siempre ha sido la recurrencia de la enfermedad, resultado de células tumorales remanentes a la cirugía e ineficiencia de la quimioterapia o radioterapia. Por ello, la inmunoterapia ha abierto las puertas a



una alternativa, con el potencial de mejorar la calidad de vida de los pacientes por medio de una inhibición específica y continua de los diversos puntos de control por los que los tumores logran sobrevivir en el cuerpo.

Tratamientos para el cáncer de próstata.

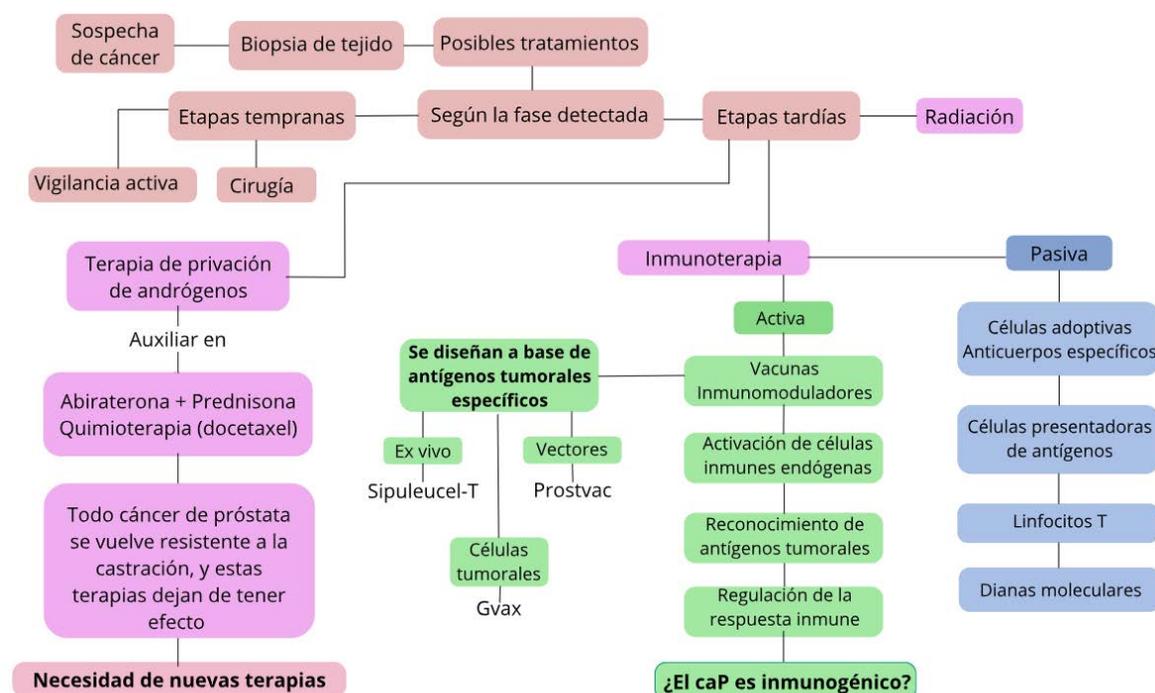


Figura 1. Etapas y tratamientos para el cáncer de próstata

Fuente: Adaptado de Sarmiento-Rubiano, L. A. (2015). Antígenos asociados a tumores y su potencial uso en el tratamiento del cáncer. *Revista Salud Uninorte*, 31(1), 118-137.

El uso de inmunoterapias no se establece en el Protocolo de Atención Integral, pero sí se presenta en la NOM-048-SSA2-2017, donde se describen el Sipuleucel-T y el Denosumab, un anticuerpo monoclonal, como opciones de tratamiento, sin dar detalles sobre su uso ni disponibilidad. Según la American Cancer Society, las inmunoterapias se consideran una opción de tratamiento para cáncer en etapas avanzadas, sobre todo en aquellos que son incurables, pero sí tratables. Las inmunoterapias son una serie de tratamientos contra el cáncer que ayudan al cuerpo a combatir esta enfermedad valiéndose de mecanismos del sistema inmune (Immunotherapy for Cancer - NCI, 2015). Dentro de las inmunoterapias existen distintas clasificaciones, principalmente en función a su origen y mecanismo de acción. En este escrito se pretende abordar alguna de las existentes.



Mecanismos de las inmunoterapias en cáncer de próstata

El cáncer de próstata se considera un tumor frío, pertenece al grupo de tumores que no suelen generar una respuesta inmune fuerte debido a que se rodean con células con la capacidad de suprimir la respuesta inmune por medio de diversos mecanismos que impiden la entrada de activación e infiltración de células T. En la Figura 2 se resumen las estrategias vigentes para el tratamiento por inmunoterapias del cáncer de próstata (Téllez-Bañuelos et al., 2023).

Mecanismos de acción de inmunoterapias

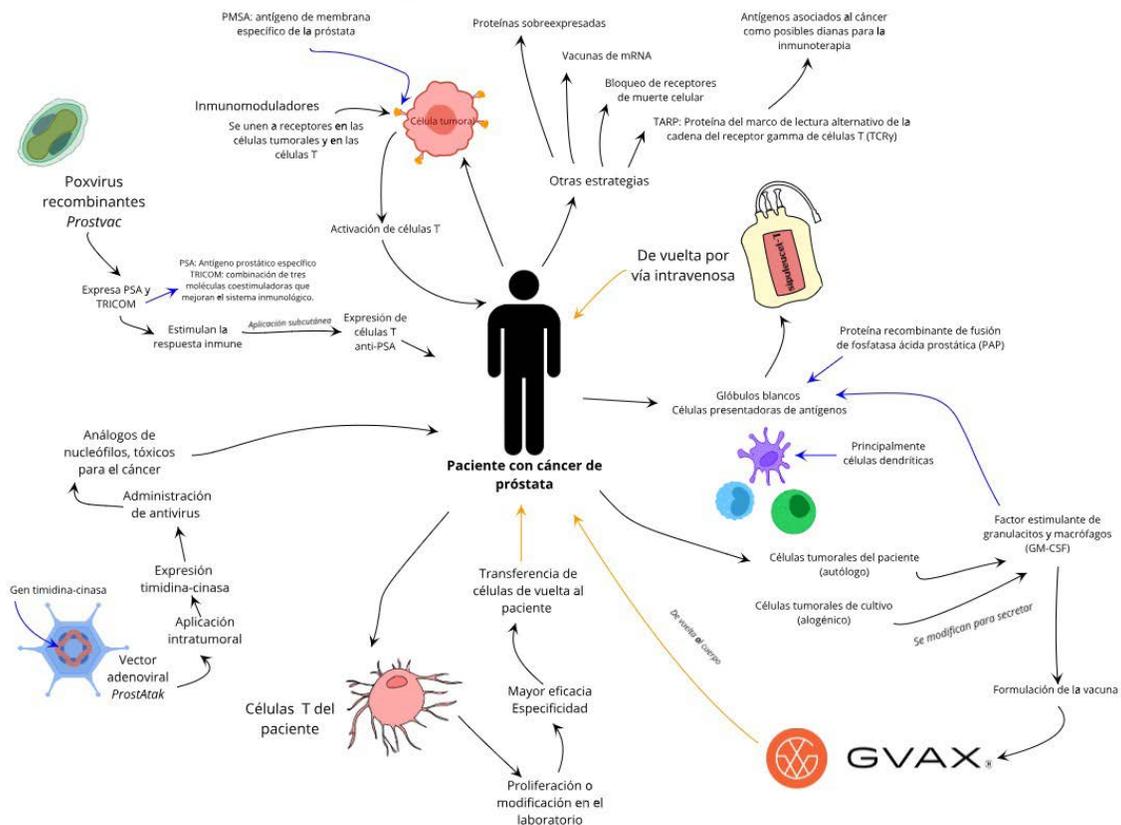


Figura 2. Mecanismos de acción de las inmunoterapias en cáncer de próstata

Fuente:

Hasta ahora las pruebas clínicas de inmunoterapias en cáncer de próstata se han enfocado en la supresión de un único mecanismo; sin embargo, el microambiente tumoral del cáncer de próstata es altamente inmunosupresor, en esto influye más de un factor: los linfocitos T reguladores, macrófagos asociados a tumores y células supresoras derivadas de mieloides, las secreciones de células estromales tumorales y fibroblastos, la producción de adenosina y del factor de crecimiento tumoral beta y su potencial inmunosupresor (Stultz & Fong, 2021).



Entre las ventajas de la inmunoterapia están su precisión al atacar únicamente células cancerosas, su dinamismo al poder adaptarse continuamente con los posibles cambios en los tumores y el sistema inmune del individuo, al igual que su capacidad de generar una “memoria” a partir de la presencia del cáncer en el cuerpo. Las inmunoterapias emplean los distintos mecanismos fundamentales para la supervivencia del cáncer e interfieren con ellos, aunque también existen aquellas cuyo objetivo es brindar “herramientas” al sistema inmune para combatir el cáncer: aumentan la cantidad de células inmunes, las acercan a las células cancerosas o mejoran la señalización que les permitirá encontrarlas (Cancer Research Institute, s. f.).

Vacunas contra el cáncer

Las vacunas contra el cáncer tienen un funcionamiento similar a las vacunas convencionales; ayudan a que el sistema inmunitario reconozca a las células cancerosas y las pueda eliminar más fácilmente, utilizando blancos en los tumores que los distinguen de las células normales como la fosfatasa ácida prostática (PAP), que se sobre expresa en las células de cáncer de próstata (Vacunas contra el cáncer, s. f.) o los antígenos asociados a tumores (TAAs), que se suelen sobre expresar en células cancerosas (Sarmiento-Rubiano, 2015; Téllez-Bañuelos et al., 2023). Las vacunas pueden ser de tres orígenes: las mismas células tumorales, antígenos asociados a tumores específicos para cierto tipo de cáncer, o células dendríticas. Ya existen varias terapias aprobadas por la Food and Drug Administration (FDA), entre ellas la más conocida es la vacuna Sipuleucel-T, el único producto inmune celular autólogo aprobado en cáncer de próstata metastático resistente a la castración (Liang et al., 2023). Este tratamiento consiste en obtener células inmunes del paciente (glóbulos blancos y células dendríticas presentadoras de antígenos) y estimularlas in vitro con un antígeno de proteína de fusión recombinante que contiene fosfatasa ácida prostática (PAP) y factor estimulante de colonias de granulocitos y macrófagos (GM-CSF), para “entrenar” a las células para reconocer a las células de cáncer de próstata (Thara et al., 2011). Después, los glóbulos blancos se devuelven al paciente por vía intravenosa, de este modo se espera ataquen al cáncer de próstata de manera selectiva. A pesar de que esta terapia es común, no logra reducir el crecimiento tumoral, ni reducir los niveles de antígeno prostático. Se encuentra limitada un aumento en la supervivencia en pacientes con cáncer de próstata metastático resistente a la castración, siempre y cuando presenten pocos o ningún síntoma. Según ensayos clínicos, el Sipuleucel-T logró reducir el riesgo de muerte y aumentar la supervivencia de los pacientes que recibieron este tratamiento, pero no se encontraron diferencias significativas con respecto al lapso promedio de progresión de la enfermedad. Otra desventaja del Sipuleucel-T es la presencia de efectos secun-



darios, que pueden ir de leves a moderados e incluyen fatiga, escalofríos, dolor de espalda, fiebre, dolores articulares y náuseas, además de la posibilidad de desencadenar una respuesta autoinmunomodulatoria no deseada hacia otras terapias y tratamientos futuros (Slovin, 2017).

Se sabe que cualquier tratamiento tendrá, inevitablemente, algún tipo de efecto secundario inmediato o después de una exposición prolongada. Entre la inmunoterapia existe la viroterapia, que es el uso de virus oncolíticos modificados genéticamente para infectar y replicarse dentro de células tumorales de manera exclusiva y específica, lo que la vuelve prometedora para ser utilizada en tratamiento de pacientes con cáncer; sin embargo, la investigación con respecto a virus oncolíticos es reciente; comenzó a desarrollarse a partir de la década de los 50 (Fatima et al., 2023; Kelly & Russell, 2007). Los primeros reportes describen la regresión de cánceres en pacientes que adquirieron o con infecciones virales. A partir de esta premisa empezó la idea de la viroterapia para una opción como tratamiento en cáncer.

Inhibidores de puntos de control inmunitario

La terapia basada en el uso de inhibidores de puntos de control inmunitario está representada por los inhibidores de PD-1/PD-L1 (nivolumab) y los inhibidores de CTLA-4 (ipilimumab) y funcionan de modo similar. En condiciones normales, las proteínas de la superficie de células T se unen a proteínas presentes en células tumorales, generando una señal de “apagado” hacia las células T que evita que ataquen a dichas células tumorales (Immune Checkpoint Inhibitors - NCI, 2019). Los inhibidores de PD-1/PD-L1 (pembrolizumab) se unen tanto a la célula tumoral como al linfocito T para evitar que se transmita la señal de apagado del linfocito, mientras que los inhibidores de CTLA-4 se unen al linfocito T para evitar que las células presentadoras de antígenos lo hagan y lo inactiven de este modo, permitiendo que los linfocitos T ataquen a las células tumorales (Liang et al., 2023; D.-R. Wang et al., 2022).

Inhibición de las proteínas de punto de control PD-1 y PD-L1.

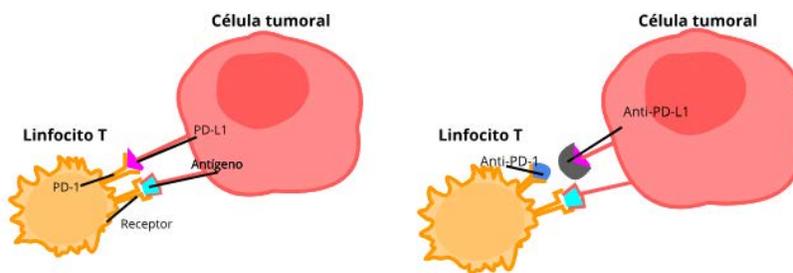


Figura 3. Esquema del funcionamiento de inhibidores de PD-1/PD-L1

Fuente: Adaptado de Wang, D.-R., Wu, X.-L., & Sun, Y.-L. (2022). Therapeutic targets and biomarkers of tumor immunotherapy: Response versus non-response. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 7(1), 1-27. <https://doi.org/10.1038/s41392-022-01136-2>

Inhibición de la proteína de punto de control CTLA-4.

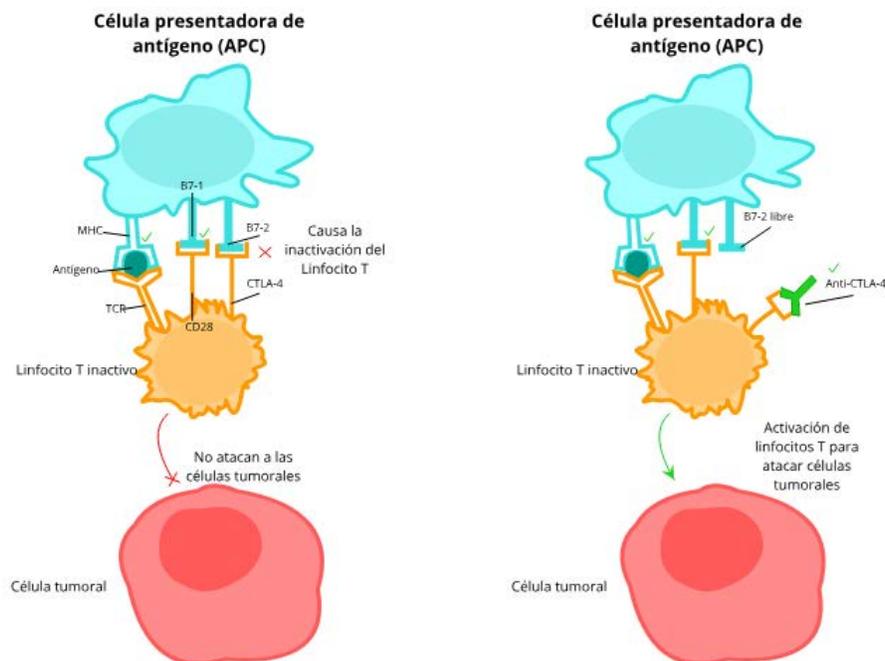


Figura 4. Esquema del funcionamiento de los inhibidores de CTLA-4

Fuente: Adaptado de: Definition of immune checkpoint inhibitor—NCI Dictionary of Cancer Terms—NCI (2011, febrero 2). <https://www.cancer.gov/publications/dictionaries/cancer-terms/def/immune-checkpoint-inhibitor>

Moduladores del sistema inmune: citocinas en la inmunoterapia

Las citocinas son proteínas pequeñas, importantes en la señalización entre glóbulos blancos y cruciales para el control del crecimiento y actividad de otras células inmunes. Las más comunes son las interleucinas y los interferones que se usan para el tratamiento de cáncer; favorecen la respuesta inmune del cuerpo contra el cáncer valiéndose de las citoquinas, por ejemplo: estas proteínas de los glóbulos blancos se utilizan como tratamiento para el cáncer (interferones, interleucinas) o al momento de reducir los efectos secundarios causados por el daño a las células sanguíneas que resulta de otros tratamientos como la quimioterapia. Se les conoce como factores de crecimiento hematopoyético, a este grupo pertenece el GM-CSF, factor estimulante de colonias de granulocitos y macrófagos (GM-CSF) y factor estimulante de colonias de granulocitos (G-CSF) (Conlon et al., 2019; D.-R. Wang et al., 2022).

Dentro de esta categoría también entran fármacos que estimulan al sistema inmune y provocan la liberación de interleucinas (IL). Se emplea la IL-2, aprobada por la FDA, para cáncer de riñón y melanoma metastático, en tratamientos por sí sola o como auxiliar de quimioterapia o Interferón alfa ($IFN\alpha$), las cuales ayudan



a evitar la formación de nuevos vasos sanguíneos. El IFN α fue la primera citocina aprobada para el tratamiento de cáncer en seres humanos en 1986, años más tarde, en 1992, se aprobó el uso de IL-2 para carcinoma renal metastático y en 1998 para melanoma metastático (Conlon et al., 2019; Mirlekar & Pylayeva-Gupta, 2021).

Virus para uso en inmunoterapia

En 2015 la FDA aprobó una terapia con virus oncolíticos basada en el Virus del Herpes Simplex (HSV) para el melanoma avanzado. En Japón se le otorgó una aprobación provisional a otro HSV para la terapia intratumoral de pacientes con glioma que no puede ser operado. Este es un avance de suma relevancia, ya que antes de este suceso los cánceres de piel eran los únicos aprobados para ser tratados por virus oncolíticos en Estados Unidos (Russell et al., 2022). En el mundo se han aprobado a la fecha cuatro terapias basadas en el uso de virus oncolíticos: T-VEC en Estados Unidos, Delytact para glioma maligno en Japón (2021), H101 para carcinoma nasofaríngeo en China (2005) y ECHO-7, un picornavirus para Melanoma aprobado en Latvia (2004) (Rahman & McFadden, 2021). El desarrollo de este tipo de terapias se ha visto ralentizado por las limitantes que tienen al momento de la infección. Es importante que el paciente no haya sido expuesto a los virus previamente para que no tenga inmunidad contra él, además es necesario que se puedan producirse en dosis altas de manera eficiente (Volovat et al., 2024). Con el avance de las técnicas de biología molecular el potencial de estos tratamientos se ha elevado mucho, al dejar de ser solo agentes citolíticos, y en cambio convertirse en medios por los que es posible atacar directamente los marcadores de cáncer o replicarse selectivamente en células tumorales, sin dañar las células sanas (Lin et al., 2023).

Ventajas de los virus con respecto a las inmunoterapias

Los virus oncolíticos son aquellos que se utilizan en terapias contra el cáncer, ya que suelen ser inocuos para el ser humano y su replicación mejora dentro de las células cancerosas, aprovechando las deficiencias en sus mecanismos de defensa. Con las modificaciones que se les realizan, los virus son capaces de reconocer y penetrar únicamente células tumorales, usualmente gracias a la ausencia de genes supresores de tumores, como p53. En el caso del cáncer de próstata, es posible considerar un mecanismo de entrada que utilice sus altos niveles de ácido siálico como dianas para tratamientos nuevos (Orozco-Moreno et al., 2023). Los virus oncolíticos superan a las terapias convencionales y a las inmunoterapias al tener un rango más amplio de rutas de acción contra las células tumorales. La mayoría pueden generar una respuesta autoinmune al activar rutas de respuesta antitumoral y liberar antígenos



tumorales, además, son un excelente auxiliar al momento de utilizar terapias combinadas gracias a la complejidad de los mecanismos necesarios para que los virus logren tener un efecto en el microambiente tumoral. La mayoría de los virus que se evalúan son virus de RNA monocatenario y de DNA de doble cadena, con sus propias ventajas y desventajas. En algunos casos se emplean virus nativos que han sido atenuados o vectores genéticamente modificados (Lin et al., 2023).

Mecanismos antitumorales de los virus oncolíticos

Los virus oncolíticos pueden inducir la muerte de las células tumorales de más de una forma (Ilustración 5): Lisis directa, en la que los virus se reproducen en grandes cantidades dentro de las células, lo que daña su estructura y genera estrés, que a su vez activa rutas de citólisis (ruptura de la membrana) y apoptosis; remodelación del microambiente tumoral, en la que los virus favorecen un ambiente tumoral “cálido”, que permite la acción del sistema inmune del paciente. A su vez, este mecanismo tiene diversas rutas, que suelen involucrar inflamación local inducida por el virus, y la regulación indirecta de apoptosis en las células tumorales infectadas y no infectadas; El gene targeting por virus oncolíticos utiliza las alteraciones que tienen las células tumorales, y las aprovechan para activar una respuesta inmune como la apoptosis, o para infectar células cercanas; la disrupción del sistema vascular tumoral entorpece la angiogénesis, destruye las células del sistema vascular tumoral, causa agregación celular y ralentiza el flujo sanguíneo, lo que genera estrés en las células tumorales; la reprogramación metabólica de las células tumorales se da cuando los virus utilizan los recursos que una célula normalmente utilizaría (aminoácidos, lípidos, ácidos nucleicos), y los emplean para su propia replicación; y muerte celular inmunogénica (ICD, por sus siglas en inglés). La ICD por virus oncolíticos se puede dar por apoptosis, necrosis o necroptosis, piroptosis y autofagia. En la apoptosis, los virus causan la muerte celular por medio de rutas mediadas por receptores, regulan la unión de los ligandos a estos receptores, iniciando una cascada de señalización para apoptosis extrínseca. La necrosis es una ruta de muerte incontrolada que se caracteriza por la ruptura de la membrana plasmática e inflamación de los organelos; está causada por factores de estrés que activarán el inflamosoma. Esta ruta de muerte celular no se suele utilizar mucho, pero sí hay modificaciones a los virus, que tienen como objetivo activar sustancias que lleven a ella. En comparación con la necrosis, la necroptosis ha sido más estudiada como una posible ruta de muerte celular por virus oncolíticos. Es independiente de caspasas y en cambio requiere de la activación de cinasas RIPK1 y RIPK3 para formar el necrosoma, que fosforilará y activará proteínas similares a las cinasas de linaje mixto, lo que a su vez permea la



membrana y causa la liberación de DAMPS. En la piroptosis los virus oncolíticos pueden regular la ruta de muerte celular inflamatoria piroptótica, que lleva a una reducción del tamaño del tumor o remisión y también a la liberación de citocinas proinflamatorias que activarán una respuesta antitumoral adicional. La autofagia, por su parte, es un tipo de muerte celular en el que la célula descompondrá moléculas dañadas o anormales dentro de su citoplasma para utilizarlas en otras funciones celulares importantes, y se da principalmente en periodos de estrés o ayuno. Los virus oncolíticos tienen la capacidad de inducir este tipo de muerte celular al activar el autofagosoma o mejorar su efecto al incluir la síntesis de moléculas relacionadas a la autofagia en las secuencias de los virus (Volovat et al., 2024).

Mecanismos de acción de los virus oncolíticos

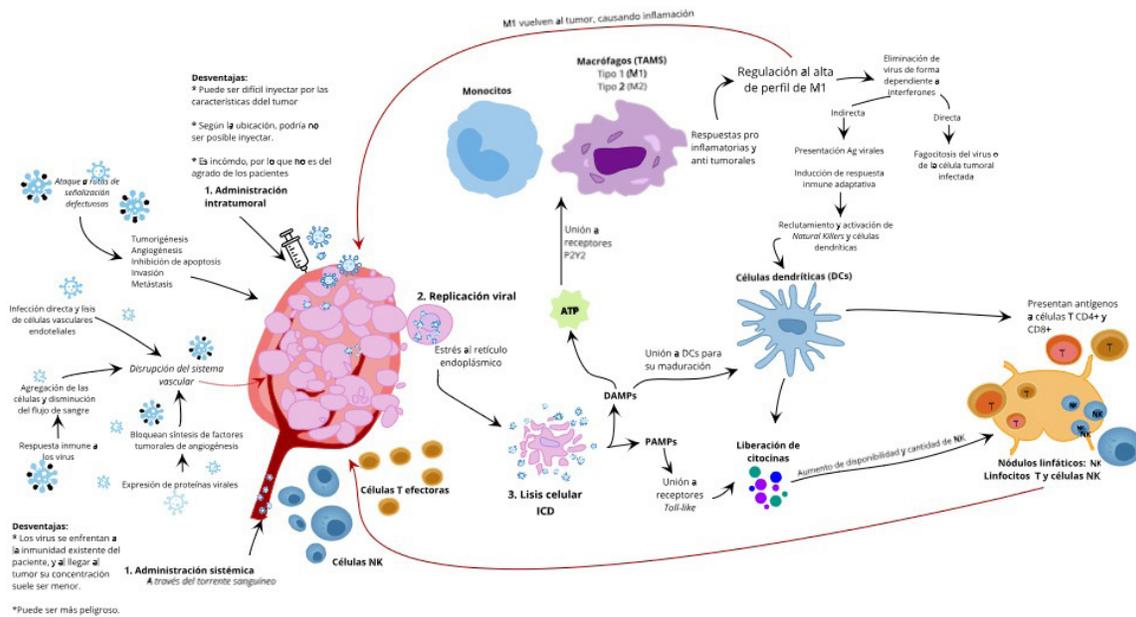


Figura 5. Mecanismos de acción de los virus oncolíticos

Fuente: Adaptado de: Volovat, S. R., Scripcariu, D. V., Vasilache, I. A., Stolniceanu, C. R., Volovat, C., Augustin, I. G., Volovat, C. C., Ostafe, M.-R., Andreea-Voichița, S.-G., Bejusca-Vieriu, T., Lungulescu, C. V., Sur, D., & Boboc, D. (2024). Oncolytic Virotherapy: A New Paradigm in Cancer Immunotherapy. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/ijms25021180>

La importancia de las modificaciones a los virus destinados a terapia oncolítica reside en “armar” a los virus para combatir con una mayor especificidad a las células tumorales y sus mecanismos: tal es el caso de la angiogénesis. Algunos virus han sido modificados para tener cierto grado de preferencia para infectar células endoteliales asociadas a tumores y reducir la neovascularización tumoral en tumores malignos de la vaina del nervio periférico.



Volviendo al cáncer de próstata, la propuesta de terapias basadas en virus oncolíticos se vuelve aún más atractiva, siendo que las terapias convencionales no son capaces de distinguir entre las células cancerosas de próstata. Al ser la próstata un órgano no esencial, es posible obtener muestras de tejido de una manera relativamente sencilla y monitorear los niveles de antígeno prostático para llevar un control del efecto de la terapia. En este caso particular, los virus que se han empezado a probar están modificados genéticamente, naturalmente atenuados o no son patogénicos en seres humanos (Fukuhara et al., 2010). Entre los virus que han sido más probados como posibles tratamientos contra cáncer de próstata están los Adenovirus oncolíticos creados específicamente para replicarse en células con mutaciones en p53; también se inactivan sus genes virales para ponerlos bajo el control de un promotor específico del tejido o del tumor en sí, de modo que les es imposible replicarse en células normales.

Conclusiones

El tratamiento del cáncer de próstata presenta muchos desafíos, tanto para las terapias convencionales, como para las inmunoterapias; aunque se podría decir que la prognosis es favorable cuando hay un diagnóstico temprano, las tasas de mortalidad por este tipo de cáncer, suelen ser elevadas, y los fallecimientos suelen darse tras la metástasis del tumor hacia los huesos (Williams, 2023). En el presente trabajo, se presentaron algunas inmunoterapias que ya son usadas en el tratamiento del cáncer de próstata, así como sus limitantes y funcionamiento, y se ofreció una perspectiva sobre la posibilidad de introducir los virus oncolíticos como tratamientos coadyuvantes para las inmunoterapias contra cáncer de próstata, aprovechando su versatilidad y afinidad por infectar células cancerosas y diseminarse por el tumor sin afectar células sanas (Fukuhara et al., 2010), y su capacidad de modificar el microambiente tumoral frío del cáncer de próstata, facilitando así la acción de las inmunoterapias y la respuesta inmune del paciente (G. Wang et al., 2022).

Referencias

- Cancer Research Institute. (s.f.). *Vacunas contra el cáncer*. Recuperado 12 de diciembre de 2024 de <https://www.cancerresearch.org/es/treatment-types/cancer-vaccines>
- Cancer Research Institute. (s. f.). *What Is Immunotherapy?* Recuperado 9 de diciembre de 2024, de <https://www.cancerresearch.org/what-is-immunotherapy>
- Conlon, K. C., Miljkovic, M. D., & Waldmann, T. A. (2019). Cytokines in the Treatment of Cancer. *Journal of Interferon & Cytokine Research*, 39(1), 6-21. <https://doi.org/10.1089/jir.2018.0019>



- Fatima, M., Amraiz, D., & Navid, M. T. (2023). Oncolytic Virotherapy. En A. S. Qazi & K. Tariq (Eds.), *Therapeutic Approaches in Cancer Treatment* (pp. 105-126). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27156-4_7
- Fukuhara, H., Homma, Y., & Todo, T. (2010). Oncolytic virus therapy for prostate cancer. *International Journal of Urology*, 17(1), 20-30. <https://doi.org/10.1111/j.1442-2042.2009.02383.x>
- Gupta, S., & Shukla, S. (2022). Limitations of Immunotherapy in Cancer. *Cureus*, 14(10), e30856. <https://doi.org/10.7759/cureus.30856>
- Instituto Nacional de Salud Pública. (2020). *Mortalidad por cáncer de próstata en México a lo largo de tres décadas*. <https://www.insp.mx/avisos/4189-cancer-prostata-mx.html>
- Instituto de Salud para el Bienestar. (2022, junio 11). *Día Mundial del Cáncer de Próstata | 11 de junio*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/insabi/articulos/dia-mundial-del-cancer-de-prostata-11-de-junio?idiom=es>
- Joniau, S., Van der Eeckt, K., Briganti, A., Gontero, P., Van Bruwaene, S., Karnes, R. J., Spahn, M., & Van Poppel, H. (2013). Papel actual de la cirugía en el cáncer de próstata de alto riesgo. *Archivos Españoles de Urología*, 66(3), 259-274. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1810/181037744002.pdf>
- Kelly, E., & Russell, S. J. (2007). History of Oncolytic Viruses: Genesis to Genetic Engineering. *Molecular Therapy*, 15(4), 651-659. <https://doi.org/10.1038/sj.mt.6300108>
- Liang, H., Liu, Y., Guo, J., Dou, M., Zhang, X., Hu, L., & Chen, J. (2023). Progression in immunotherapy for advanced prostate cancer. *Frontiers in Oncology*, 13, 1126752. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1126752>
- Lin, D., Shen, Y., & Liang, T. (2023). Oncolytic virotherapy: Basic principles, recent advances and future directions. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01407-6>
- Mirlekar, B., & Pylayeva-Gupta, Y. (2021). IL-12 Family Cytokines in Cancer and Immunotherapy. *Cancers*, 13(2), 167. <https://doi.org/10.3390/cancers13020167>
- National Cancer Institute. (2022). *Immune Checkpoint Inhibitors*. <https://www.cancer.gov/about-cancer/treatment/types/immunotherapy/checkpoint-inhibitors>
- National Cancer Institute. (2019). *Immunotherapy to Treat Cancer*. <https://www.cancer.gov/about-cancer/treatment/types/immunotherapy>
- Orozco-Moreno, M., Visser, E. A., Hodgson, K., Hipgrave Ederveen, A. L., Bastian, K., Goode, E. A., Öztürk, Ö., Pijnenborg, J. F. A., Eerden, N., Moons, S. J., Rossing, E., Wang, N., de Haan, N., Büll, C., Boltje, T. J., & Munkley, J. (2023). Targeting aberrant sialylation and fucosylation in prostate cancer cells using potent metabolic inhibitors. *Glycobiology*, 33(12), 1155-1171. <https://doi.org/10.1093/glycob/cwad085>



- Rahman, M. M., & McFadden, G. (2021). Oncolytic Viruses: Newest Frontier for Cancer Immunotherapy. *Cancers*, 13(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/cancers13215452>
- Russell, S. J., Bell, J. C., Engeland, C. E., & McFadden, G. (2022). Advances in oncolytic virotherapy. *Communications Medicine*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s43856-022-00098-4>
- Sarmiento-Rubiano, L. A. (2015). Antígenos asociados a tumores y su potencial uso en el tratamiento del cáncer. *Revista Salud Uninorte*, 31(1), 118-137.
- Silberstein, J. L., Pal, S. K., Lewis, B., & Sartor, O. (2013). Current clinical challenges in prostate cancer. *Translational Andrology and Urology*, 2(3), 122-136. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2223-4683.2013.09.03>
- Slovin, S. F. (2017). Sipuleucel-T: When and for Whom to Recommend It. *Oncology (Williston Park, N.Y.)*, 31(12), 900-901, 910-912.
- Stultz, J., & Fong, L. (2021). How to turn up the heat on the cold immune microenvironment of metastatic prostate cancer. *Prostate Cancer and Prostatic Diseases*, 24(3), 697-717. <https://doi.org/10.1038/s41391-021-00340-5>
- Téllez-Bañuelos, M. C., Solorzano-Ibarra, F., Sierra-Díaz, E., Vázquez-Urrutia, J. R., Hernández-Flores, G., Bravo-Cuellar, A., González-Ochoa, S., & Ortiz-Lazareno, P. C. (2023). Immunotherapy in prostate cancer: Fundamentals and opportunities for its application in the clinic. *Gaceta Mexicana de Oncología*, 22(3), 10628. <https://doi.org/10.24875/j.gamo.M23000243>
- Thara, E., Dorff, T. B., Pinski, J. K., & Quinn, D. I. (2011). Vaccine therapy with sipuleucel-T (Provenge) for prostate cancer. *Maturitas*, 69(4), 296-303. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2011.04.012>
- Torres-Sánchez, L., Hernández-Pérez, J. G., Escamilla-Nuñez, C., Rodríguez-Covarrubias, F., Manzanilla-García, H., Mohar, A., Morales-Carmona, E., Espin-Arellano, L. I., Hernández-Ávila, J. E., & Lajous, M. (2023). Disparities on prostate cancer survival in Mexico: A retrospective cohort study. *Salud Pública de México*, 65(3), 236-244. <https://saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/14266/12381>
- Volovat, S. R., Scripcariu, D. V., Vasilache, I. A., Stolniceanu, C. R., Volovat, C., Augustin, I. G., Volovat, C. C., Ostafe, M.-R., Andreea-Voichita, S.-G., Bejusca-Vieriu, T., Lungulescu, C. V., Sur, D., & Boboc, D. (2024). Oncolytic Virotherapy: A New Paradigm in Cancer Immunotherapy. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/ijms25021180>
- Wang, D.-R., Wu, X.-L., & Sun, Y.-L. (2022). Therapeutic targets and biomarkers of tumor immunotherapy: Response versus non-response. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 7(1), 1-27. <https://doi.org/10.1038/s41392-022-01136-2>



- Wang, G., Liu, Y., Liu, S., Lin, Y., & Hu, C. (2022). Oncolytic Virotherapy for Prostate Cancer: Lighting a Fire in Winter. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20), 12647. <https://doi.org/10.3390/ijms232012647>
- Williams, N. R. (2023). Analysis of Clinical Trials and Review of Recent Advances in Therapy Decisions for Locally Advanced Prostate Cancer. *Journal of Personalized Medicine*, 13(6), 938. <https://doi.org/10.3390/jpm13060938>

Conocimientos y prácticas tradicionales en la gastronomía de los hongos silvestres de mujeres cocineras de San Antonio Cuajimoloyas, Oaxaca

Israel Marruffo Betancourt¹, Iván Israel Juárez López^{2*} y Alary Pereyra Martínez³

¹Licenciado en Gastronomía, Escuela de Gastronomía Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca

²Docente del Instituto de Ciencias de la Educación, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca

³Docente de la Escuela de Gastronomía, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca

*Autor de correspondencia: ivanjuarez@iceoaxaca.edu.mx

Resumen

Palabras clave:

gastronomía, hongos silvestres, identidad cultural, mujeres indígenas.

El objetivo del artículo es mostrar los conocimientos y las prácticas tradicionales en los usos gastronómicos de los hongos silvestres comestibles que tienen las mujeres cocineras tradicionales de San Antonio Cuajimoloyas, una comunidad indígena de Oaxaca en la región sureste de México. Los conocimientos y prácticas tradicionales están presentes desde la etapa de la recolección de los hongos y la conservación de los recursos naturales, los utensilios para la preparación de los platillos, el emplatado y consumo, con impacto en los sabores, aromas, consistencia, calidad nutrimental, etcétera. Se utilizó una metodología con enfoque cualitativo y alcance descriptivo-correlacional en donde se aplicó la entrevista a profundidad y la observación participante. En total se recuperan experiencias de seis cocineras tradicionales identificadas a partir de un muestreo no probabilístico. Se concluye que el proceso de preparación de los platillos tradicionales con hongos silvestres forma parte de la identidad natural, cultural y gastronómica de la comunidad, sostenida por el trabajo central de las mujeres cocineras tradicionales que resulta importante preservar y difundir ante la desvalorización de esos conocimientos y prácticas en los últimos años.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 133-153.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14708319>

Recibido: 09 de octubre 2024
Revisado: 11 de noviembre 2024
Aceptado: 13 de enero 2025
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Introducción

Este artículo tiene como objetivo mostrar los conocimientos y las prácticas tradicionales en los usos gastronómicos de los hongos silvestres comestibles y las formas de promoción generados



en las experiencias de cocineras tradicionales de San Antonio Cuajimoloyas, una comunidad indígena de Oaxaca en la región sureste de México. Los conocimientos tradicionales constituyen la identidad cultural, la biodiversidad y el uso adecuado de los recursos naturales. Para Estrada (2008), estos conocimientos conllevan un elemento empírico transmitido durante varias generaciones que ha mantenido la cosmovisión, técnicas de manejo, percepción y, en general, las formas de vida comunitarias. Para Valladares y Olivé (2015) los conocimientos tradicionales constituyen un cuerpo vivo creado, mantenido y transmitido que forma parte de la identidad o espiritualidad de algunas comunidades.

De estas raíces habría que partir para analizar los conocimientos tradicionales que tienen las mujeres cocineras tradicionales en Oaxaca y las formas en que estos conocimientos se ponen en práctica con la preparación de platillos emblemáticos que fortalecen el patrimonio cultural y gastronómico de las comunidades de las que forman parte. Las etapas son distintas. Los conocimientos tradicionales están presentes desde las formas de recolección de los hongos, los utensilios utilizados para la preparación, la presentación, el emplatado y el consumo de los hongos como una etapa final, lo que tiene repercusiones en los sabores, los aromas, la consistencia, la calidad nutrimental, etcétera.

La problemática central del artículo recae en la desvalorización sistemática de esos conocimientos y prácticas tradicionales en términos sociales y económicos, lo que atenta también contra la identidad cultural y gastronómica de las mismas comunidades indígenas. El papel de las mujeres cocineras tradicionales no es reconocido en los procesos organizativos comunitarios, en el fortalecimiento de la cultura, en la gestión y el mantenimiento de los recursos naturales; menos aún se reconoce su trabajo en las prácticas modernas de la cocina profesional que intenta posicionarse por encima de la cocina tradicional. En la gastronomía de los hongos silvestres, la problemática de la desvalorización y el menosprecio de los conocimientos y prácticas tradicionales tiene mayor fuerza en los últimos años debido a que las personas de las mismas comunidades no respetan las prácticas de recolección de los hongos, tampoco utilizan los utensilios tradicionales y buscan que los alimentos y las bebidas que se promueven al interior no tengan ninguna relación con los hongos silvestres dada la presencia de personas externas que se consideran “micofóbicas” y buscan otras formas de atracción turística.

Por ello, consideramos importante realizar este tipo de investigaciones académicas para adentrarnos en los conocimientos y las prácticas tradicionales alrededor de los usos gastronómicos de los hongos silvestres y concientizar sobre su importancia nutrimental, cultural y sus propiedades medicinales, para las comunidades indígenas



en general, pero en particular para aquellas familias que también obtienen un recurso económico, tomando en consideración que en las comunidades rurales se conservan bosques aptos para la fructificación de los hongos silvestres. El presente artículo pretende abonar entonces a la discusión de cómo la cultura alimentaria de las comunidades sobre el uso de hongos silvestres permite fortalecer la identidad cultural y el manejo sostenible de recursos naturales, así como una alternativa saludable en platillos emblemáticos con hongos silvestres, como son las quesadillas, las empanadas, el asado, el empanizado, mole rojo, mole chichilo, mole amarillo espesado con papas, mole verde, encebollado de hongos, truchas empapeladas, entre otros.

Materiales y Métodos

El presente artículo es resultado de un proyecto de investigación que permitió la obtención de grado como Licenciado en Gastronomía en la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO). Este proyecto se desarrolló entre febrero de 2022 hasta mayo de 2023. El objetivo del proyecto fue conocer los conocimientos y las prácticas tradicionales en los usos gastronómicos de los hongos silvestres y las formas de promoción y rescate generados en las experiencias de cocineras tradicionales de San Antonio Cuajimoloyas, Oaxaca. Para alcanzar el objetivo trazado se utilizó una metodología con enfoque cualitativo y alcance descriptivo-correlacional que nos permitió analizar los conocimientos tradicionales en los usos gastronómicos de los hongos silvestres y las formas de promoción y rescate que generan las hongueras y cocineras tradicionales de la comunidad. Para ello, la estrategia metodológica se dividió en cuatro fases de trabajo.

La primera fase se llevó a cabo entre febrero-abril del año 2022 y consistió en realizar una investigación documental amplia acerca de los conocimientos tradicionales que existen en la comunidad de San Antonio Cuajimoloyas y de la importancia que tienen en la cotidianidad de la vida comunitaria los hongos silvestres comestibles en su gastronomía local. La segunda fase tuvo lugar entre abril y junio del mismo año, en donde nos propusimos identificar a las cocineras tradicionales con mayor prestigio dentro de San Antonio Cuajimoloyas mediante un muestreo no probabilístico que funcionó a partir de la estrategia de bola de nieve.

A partir de las fases anteriores, se realizó el diseño y la aplicación de seis entrevistas a profundidad que tuvieron lugar entre junio y septiembre del año 2022. Por último, se realizó el trabajo de sistematización y análisis de la información obtenida entre septiembre a diciembre del mismo año. Para este estudio participaron seis cocineras tradicionales que también son recolectoras de hongos silvestres comestibles, originarias de la misma comunidad de San Antonio Cuajimoloyas.



Tabla 1. Población de estudio y sus características

	Nombre	Edad	Ocupación	Fecha de entrevista
1	Merced J.	50 años	Cocinera tradicional del comedor “La Leyenda”	16 de junio de 2022
2	Bélgica L.	22 años	Cocinera Tradicional del comedor “La Leyenda”	10 de septiembre de 2022
3	Martha L.	35 años	Cocinera tradicional del comedor “La Escondida”	16 de junio de 2022
4	Martha C.	51 años	Cocinera tradicional del restaurante “Manos Oaxaqueñas de la Sierra”	16 de junio de 2022
5	María Teresa B.	39 años	Cocinera tradicional del comedor “La Montaña”	11 de septiembre de 2022
6	Daniela M.	27 años	Cocinera tradicional del restaurante “Manos Oaxaqueñas de la Sierra”	14 de julio de 2022

Fuente: propia

El 12 de abril de 2022 fue el primer día que llegamos a la comunidad de San Antonio Cuajimoloyas. La primera impresión fue la tranquilidad que se percibe por la casi ausencia de tránsito de vehículos, al igual de que es un pueblo rodeado de montañas y lleno de árboles de pino, principalmente, aunque también fue de especial interés la cantidad de plantas de maguey. Se caminó hasta encontrar el primer comedor, este fue “La Leyenda”, donde se conoció a Merced, quien compartió algunos conocimientos en cuanto a la cocina tradicional en el uso de hongos silvestres. De una conversación inicial pudimos contactar a la cocinera y honguera Martha C., considerada la cocinera con mayores conocimientos sobre los hongos silvestres, por el gran legado tradicional que le transmitieron sus abuelos, padres y hermano.

Una segunda visita se realizó el día 21 de abril de 2022 en donde fue posible conocer a la cocinera tradicional Bélgica, quien compartió su experiencia inicial en cuanto al platillo mole de chichilo. Una vez en la comunidad, fue posible identificar otro comedor que se llama “La Escondida”, en donde la especialidad son los guisos elaborados con truchas y que en temporada de lluvias los acompañan con hongos silvestres. En los recorridos acudimos con las autoridades locales e integrantes de las oficinas de ecoturismo en donde nos brindaron un contexto amplio de la comunidad y la importancia cultural y gastronómica de los hongos.

La aplicación de las entrevistas a profundidad en los meses siguientes se acompañó siempre de la cordialidad de las cocineras tradicionales, quienes nos prepararon bebidas típicas como son infusión de poleo, chocolate caliente acompañado de pan de trigo serrano y café de la olla. Las cocineras nos sirvieron un caldo de gallina criolla con sus respectivas verduras acompañado siempre de tortillas de maíz hechas a mano que son parte del menú que ofertan en sus respectivos restaurantes. Durante la aplicación de las entrevistas también caminamos conjuntamente con las autoridades y algunas cocineras tradicionales con quienes teníamos comunicación en busca de los hongos silvestres comestibles. De los hongos que mayormente se recolectaron fue *Amanita basii* y *Boletus sp.* Después de varios recorridos nos



prepararon platillos tradicionales con hongos como el empanizado, mole amarillo y hongos encebollados.

La entrevista se estructuró con preguntas encaminadas a conocer las características y los usos gastronómicos que tienen los hongos silvestres comestibles en la comunidad. Para ello, fue necesario saber qué especies de hongos silvestres comestibles son las más comunes en las preparaciones gastronómicas tradicionales; sin embargo, también se fueron planteando otras cuestiones sobre el conocimiento en cuanto a la identificación de hongos y su nomenclatura, ya que por una parte está el conocimiento tradicional y, por otra, las disciplinas científicas enfocadas al estudio de los hongos como la micología, entre otras. Durante el desarrollo de la investigación fue importante saber identificar las características morfológicas, las propiedades alimenticias y/o medicinales de las especies de hongos silvestres. A partir de estos aspectos es que pudimos conocer los diversos platillos y los procedimientos utilizados hasta su consumo, lo que se convirtió en una experiencia enriquecedora al participar en el proceso que inicia desde la recolección de los hongos.

Propiedades y características de los hongos silvestres comestibles

Es importante comprender que los hongos pertenecen a un reino distinto al de las plantas y los animales. Desde la investigación científica-biológica se han indagado las características fisicoquímicas y propiedades organolépticas únicas que tienen los hongos, además de su biodiversidad, lo que ha permitido su clasificación al reino denominado fungi. En la temática del reino biológico al que pertenecen los hongos, Pérez et al. (2019) afirman:

Los hongos no son plantas ni animales, son hongos y hasta tienen su propio reino: el reino Fungi; es uno de los grupos de eucariotes (organismos que presentan células con núcleo bien definido y delimitado por una membrana) más diverso de los seres vivos, y ocupan el segundo lugar después de los insectos. Pueden ser unicelulares, como las levaduras, filamentosos, como los mohos, o los que encontramos en el campo; estos dos últimos están conformados por hifas (células filamentosas que en conjunto forman un micelio, siendo éste el verdadero hongo). La pared de las células está conformada principalmente de quitina, lo que los hace más cercanos a los animales; tienen ergosterol, a diferencia de los animales que presentan colesterol (p. 20).

Villegas, López y Fonseca (2023) añaden que los hongos en general no son plantas porque no fotosintetizan y tampoco son animales porque no poseen un sistema endocrinológico ni tampoco nervioso. Al respecto, los hongos silvestres comestibles resultan ser un alimento con un alto valor nutritivo, además de los sabores, aromas, colores, formas y texturas que los caracterizan y que son preparados



de forma tradicional por generaciones que han sabido apreciar y aprovechar sus propiedades, aunque actualmente también se ha empezado a valorar su consumo de manera general. Román (2015) señala que:

La composición nutricional de los hongos comestibles es uno de los factores que ha cobrado importancia en los últimos años para su consumo, sin dejar de lado su aceptación basada principalmente en sus características organolépticas incluyendo su color, textura, sabor y olor (p. 38).

Conforme a la composición nutrimental general de los hongos comestibles silvestres, se informa que: “proporcionan una gran variedad de minerales (Ca, K, P), elementos traza (Cu, Zn, Fe). Además, son fuente de vitaminas, tales como: vitamina C (L-ácido ascórbico), B1 (tiamina), B2 (riboflavina), niacina y ácido fólico” (Jiménez et al., 2013, p. 205). En México los hongos silvestres comestibles tienen una gran importancia tradicional, económica, ecológica y gastronómica. Además, nutricionalmente son considerados un alimento proteico.

Los hongos comestibles han sido apreciados tradicionalmente en nuestro país, por su sabor y aroma además de su valor económico y ecológico, tienen una composición química que los hace atractivos desde el punto de vista nutricional, en general contienen 90 % de agua y 10 % de materia seca, entre 27 y 48 % de proteína y cerca de 60 % de carbohidratos y del 2 al 8 % de lípidos (Román, 2015, p. 5).

El estudio micológico realizado por Román (2015) muestra las propiedades nutricionales de algunos hongos silvestres comestibles. Las especies consideradas en su investigación fueron *Cantharellus odoratus* y *Amanita jacksonii*, las cuales mostraron ser buena fuente de vitamina C y *riboflavina*, *Amanita basii* con el mayor contenido de proteína y *Ramaria fennica* con el contenido más bajo de grasas, además de Selenio con antioxidantes. Este autor señala que las concentraciones de vitaminas de dichas especies son distintas; sin embargo, son superiores a las reportadas por hongos cultivados (p. 33). Esta investigación es importante porque demuestra que los hongos silvestres comestibles, en comparación a los hongos cultivados, conservan elementos que resultan valiosos desde la mirada nutricional.

Dada la naturaleza de los hongos silvestres comestibles, por sus propiedades nutricionales y organolépticas, además de que su consumo es generalmente local y de temporada, son asociados con tendencias o alternativas alimentarias, importante para ciertas dietas como la vegetariana. Isokauppila (2019) señala:

Vale la pena considerar que, como ocurre con muchas tendencias, las alimentarias son cíclicas. Algunas de las mayores modas en alimentación se basan en tomar alimentos locales y de temporada. Los hongos están de moda de formas distintas. Su contenido natural en azúcar es bajo, no contienen gluten, son ricos en nutrientes y constituyen un excelente sustituto vegano y vegetariano de la carne. A la hora de cocinarlos, son increíblemente versátiles y,



por esta razón, las dietas paleo, primal y las basadas en alimentos de origen vegetal incluyen muchas recetas con hongos (pp. 40-41).

Existen hongos macroscópicos comestibles más potenciales que otros en cuanto a salud se refiere dado que los usan como parte de una dieta diaria y tienen un discernimiento claro, amplio y específico sobre sus usos medicinales. Tomando en consideración la biodiversidad de hongos silvestres comestibles que existen en la comunidad de estudio, es importante tomar en consideración su conservación, su uso alimenticio y curativo. Conforme a las propiedades de los hongos silvestres funcionales se menciona:

Entendiéndose como alimento funcional, aquellos alimentos que se consumen no solo por sus propiedades nutricionales sino también por cumplir una función específica que ofrece beneficio a la salud y reduce el riesgo de contraer enfermedades. Para que un alimento sea funcional en este caso los hongos, deben contener determinados minerales, vitaminas, ácidos grasos o fibra alimenticia, componentes que se encuentran en algunas especies de manera balanceada, estas propiedades son únicas y diferentes a las aportadas por otros alimentos altamente consumidos, ya que los hongos forman un reino diferente de las plantas y animales (Román, 2015, p. 27)

De manera general, sobre el uso funcional de los hongos comestibles se establece que:

Los hongos comestibles son apreciados por su fuente valiosa en la gastronomía, sin embargo, no solo por su sabor sino por sus cualidades en aporte nutricional y químico. En esencia, los hongos comestibles han alcanzado la posición de alimento funcional, siendo explotado incluso en medicinas naturales (Jiménez, 2022, p. 26).

Otra de las cualidades que tienen los hongos son los inmunomoduladores, puesto que actúan sobre el sistema inmunitario del cuerpo humano de manera que hacen que se mantenga estable en situaciones como resfriados o enfermedades, ya que el cuerpo se confunde y se ataca al tratar de resolver esos problemas y desarrolla enfermedades autoinmunitarias, ya sea con una respuesta de defensa hipoactiva o hiperactiva (Isokauppila, 2019, pp. 27-28). De acuerdo a Jiménez et al. (2013): “los hongos comestibles silvestres son un recurso forestal no maderable que ha sido utilizado desde épocas prehispánicas en México por su alto contenido nutrimental y propiedades medicinales” (p. 199). En cuanto a los usos gastronómicos, autores como Isokauppila (2019) señalan que los hongos silvestres son alimentos naturales que pueden prepararse de muchas formas, pero hay que prestar atención a la combinación de sus sabores y a la preparación de los ingredientes, además de saber cómo hacer para que sus propiedades curativas se conserven después de cocinarlos y no se pierdan en el proceso de preparación.



El contexto comunitario de San Antonio Cuajimoloyas

San Antonio Cuajimoloyas es una comunidad perteneciente al estado de Oaxaca, una entidad que registra la mayor diversidad natural y cultural de México, lo que incluye al reino de hongos silvestres que han constituido parte importante de las estrategias de subsistencia familiar desde épocas prehispánicas. En esta comunidad se protegen las áreas naturales, ya que los habitantes locales han sabido valorar las bondades de la propia naturaleza y demás recursos comunes. Los hongos silvestres comestibles forman parte de la cultura natural y alimentaria en donde además se obtienen ingresos económicos a través de la elaboración de diversos platillos tradicionales.

Esta comunidad se localiza en la Sierra Norte de Oaxaca, a una distancia aproximada de 60 kilómetros de la ciudad de Oaxaca de Juárez. Cuenta con bosques de oyamel, pino y encino que coexisten con más de 300 especies de hongos silvestres comestibles. Acerca de las culturas que forman parte de la herencia e historia de la comunidad de San Antonio Cuajimoloyas, se destaca que conviven grupos étnicos de tres grandes vertientes de la cultura mesoamericana: zapoteca, chinanteca y mixe. La palabra “cuajimoloyas” deriva del zapoteco que significa “mole cuajado en ollas” en alusión al mole que se prepara para las festividades como el Día de Muertos, pero por el intenso frío el mole se “cuajó”, señalan las historias de las y los pobladores locales, lo que dio paso al nombre de la comunidad. En los últimos años, se tiene en la comunidad servicios turísticos como temazcal, cabañas, comedores, miradores, recorridos a pie, cabalgatas, criadero de truchas y tirolesa que se suman a la gastronomía de los hongos.

Es importante mencionar algunos de los hongos más valorados en San Antonio Cuajimoloyas a partir de las experiencias de algunas cocineras tradicionales participantes en este estudio. En primer lugar, está el hongo *Lyophyllum*, conocido por la lengua zapoteca como *Beshia gupa* que significa “nanacate de tierra”. Esta especie tiene características similares con la especie *Lyophyllum decastes*, la cual posee un sombrero, cuyo diámetro oscila entre 2 cm a 10 cm, tiene forma esférica y cuando madura se aplana, hundiéndose en el centro. Tiene cutícula lisa, que en ambientes húmedos se ve brillante y en ambientes secos se ve mate, su color marrón grisáceo varía entre tonos claros y oscuros. Este hongo posee un curvo pie cilíndrico de color blanco y a pesar de no poseer un olor particular su sabor es dulce. En la comunidad se consume en caldo y en salsas; comúnmente es frito y tras dejarlo secar se agrega al caldo (ver Figura 1).



Figura 1. Hongo *Lyophyllum*
Fuente: propia

Otro hongo es *Cantharellus cibarius* que se conoce como “mantequilla”. En la lengua zapoteca se conoce como *Baya dee* (se pronuncia Beshadé). Esta especie tiene un sombrero carnoso, irregular, con forma de copa y bordes ondulados que mide de 2 cm a 12 de diámetro, se caracteriza por tener un color amarillo similar al de la yema de huevo. Su pie es grueso, cilíndrico y carnoso. Debido a su forma es difícil distinguir donde empieza el sombrero y termina el pie. Posee un olor afrutado y un sabor dulce (ver Figura 2).



Figura 2. Hongo *Cantharellus cibarius*
Fuente: propia

El hongo silvestre venado o blanco, científicamente llamado *Tricholoma magnivelare*, se conoce también como hongo matsutake. En las entrevistas realizadas nos mencionaron que se trata de un hongo difícil de encontrar y se tiene que recorrer varios kilómetros para encontrarlo. Su importancia se debe a que también es medicinal y nace del palo de ocote (ver figura 3).



Figura 3. Hongo *Tricholoma magnivelare*
Fuente: propia

Otro de los hongos es el *Amanita bassi*, una especie perteneciente al complejo de *Amanita sect. Caesareae*, conocido en la comunidad como “nanacate amarillo y rojo” y en zapoteco se le dice *baya bela*. Referente a su consumo se menciona que tiene sabor dulce (ver Figura 4).



Figura 4. Hongo *Amanita bassi*
Fuente: propia

Otro de los hongos es el *Boletus sp.* (Subespecie), se considera que la especie *Boletus rubriceps* o *Boletus pinophilus* son especies que nacen en la comunidad de Cuajimoloyas y que son casi idénticas a la especie *Boletus edulis*, al que le llaman ahí como “nanacate de pan” o “pancita” y en zapoteco *baya retni*. En cuanto a sus características más importantes es la cutícula con coloraciones marrón rojizas o caobas (ver Figura 5).



Figura 5. Hongo silvestre *Boletus* sp.
Fuente: propia

Resultados y discusión

La preservación que hacen las cocineras tradicionales de los bosques de la comunidad es un aspecto inicial que pudimos identificar durante la investigación como parte de los conocimientos y las prácticas tradicionales que tienen, con implicaciones en la conservación de la identidad cultural. De esta preservación depende directamente la alimentación y la obtención de ingresos económicos, en especial cuando es temporada de lluvias en los meses de agosto-noviembre, que es cuando brotan el mayor número de especies de hongos silvestres comestibles y de plantas o hierbas como quelites que son muy importantes en las preparaciones culinarias de platillos tradicionales.

La diversidad de los hongos y de plantas silvestres son dependientes de los bosques, lo que hace que se generen estrategias colectivas para revertir el mal uso de los recursos forestales y la irresponsabilidad e intereses ajenos que los pone en riesgo. En las experiencias de las cocineras tradicionales participantes existe una coincidencia acerca de que tanto el crecimiento de los hongos silvestres como de las plantas se debe gracias a una relación simbiótica entre el reino de los hongos y recursos naturales como la tierra, el agua y el aire. Por lo que cuando llegan a contaminarse los ríos por los desperdicios y desechos o se generan otros usos a los suelos que impiden conservarlos como ecosistemas naturales, de la misma manera los gases que emiten algunas fábricas y contaminan el aire, impactan al medio ambiente, alterando el ciclo de los ecosistemas.



Todo esto impacta en las prácticas tradicionales en torno a la preparación de los hongos silvestres en la comunidad. A partir de las entrevistas identificamos también que las experiencias de las cocineras son muy importantes desde la etapa de la recolección de los hongos. En este momento los hongos se recolectan sin extraer el micelio ni la volva como se observa en las figuras presentadas, pues de eso depende de que haya fructificaciones más seguidas. En las entrevistas señalaron que después de cortar la parte fructífera se procede a poner hojarasca para una mejor protección (Figura 4). Las especies de hongos se van recolectando en canastas de carrizo para que las esporas de los hongos se dispersen durante la caminata. Además, es importante mencionar que si encuentran un hongo desconocido o tóxico simplemente no se corta (ver Figura 6).



Figura 6. Proceso de recolección de un hongo *Boletus*
Fuente: propia

Posterior a la recolección de los hongos fue posible iniciar con la selección de los utensilios y la preparación de los platillos tradicionales en los respectivos restaurantes a cargo. Esta etapa resultó importante porque pudimos observar y participar en el proceso de la preparación de cada platillo con la puesta en práctica de los conocimientos tradicionales. A continuación se muestran los platillos tradicionales más emblemáticos de la comunidad y la descripción con algunas fotografías.

- Quesadillas con hongo coliflor *Sparassis crispa* y empanada con hongo *Laccaria*
- Asado del hongo *Hellvella lacunosa*
- La preparación del Empanizado de hongos
- La preparación del Empapelado de hongos
- La preparación del Encebollado de hongos



- El Mole rojo con hongos
- El Mole chichilo con hongos
- La preparación del Encebollado de hongos
- La preparación de Hongos a la mexicana
- Mole amarillo de hongo espesado con papa
- Mole verde con hongos
- La Trucha empapelada con hongos

Para la quesadilla con hongo coliflor *Sparassis crispa* y la empanada con hongo *Laccaria* de inicia con el nixtamalizado y el amasado para hacer tortillas, quesadillas, memelas y empanadas con maíz azul (Foto 1), aunque también se usa el maíz blanco. Una vez que se lleva a cabo la nixtamalización y amasado del maíz, se procede a hacer bolitas de masa (Foto 2) que se aplanan ligeramente con las manos para después aplanarlas ya al tamaño de lo que van a ser las tortillas con ayuda de una prensa y plásticos para evitar que se pegue y se rompa las tortillas en la prensa (Foto 3). Las tortillas se cuecen en el comal, que una vez cocidas se extienden para que se enfríen (Foto 4), se puedan sobreponer una sobre la otra, taparlas con una servilleta de tela y así reservarlas para el momento en que los comensales lleguen al comedor de las cocineras. Así también cuando se trata de memelas, empanadas o quesadillas, las cocineras las preparan ahí mismo, con ingredientes como el queso deshebrado con flor de calabaza, epazote y hongos previamente cocidos (Fotos 5 y 6), con tortilla ligeramente ovalada y de mayor tamaño.





Figura 7. Quesadilla y empanada con hongos
Fuente: propia

Otro platillo tradicional elaborado es el mole amarillo con hongos elaborado en el comedor de las cocineras Marta C. y Daniela M. Este platillo se hizo en una ocasión con hongos *Laccaria spp.* (Fotos 1, 2). Para acompañar se acostumbra té (infusión) de poleo (Fotos 5 y 6), chocolate caliente (Foto 7) o café. Este último se acompaña de pan de trigo hecho en la comunidad.



Figura 8. Procedimiento de la preparación del mole amarillo con hongos
Fuente: propia

Lycoperdon perlatum es una especie de hongo silvestre que cuando madura, al abrir su sombrero desprende un polvo en forma de esporas, las cuales en este caso son posible apreciar a simple vista, además de que posee propiedades medicinales para curar heridas del cuerpo humano, una forma de utilizarlo es abrir por la mitad dicho hongo y colocarse sobre la herida. Una de las cocineras mencionó que se prepara una pomada que forma parte del conocimiento heredado por el mayor honguero de San Antonio Cuajimoloyas de nombre Joel. Además, este hongo conocido como pedo de lobo o pedo de monja (*Lycoperdon perlatum*) se utiliza en la preparación del mole amarillo. Los hongos silvestres comestibles también suelen ir asados, se les agrega epazote y sal u otro ingrediente, mencionó Marta C., como con la especie *Helvella lacunosa* que comúnmente le llaman “soldadito”. Al conjunto de estos hongos se les agrega aceite de oliva y sal en un plato el cual se revuelve con las manos y se



asan en comal. La cocinera Martha señaló que este hongo así cocinado es similar en sabor a la carne de tasajo. Como parte de su cultura, la mayoría de las cocineras tradicionales y sus familiares van en busca de hongos silvestres comestibles a los bosques que rodean la comunidad cuando es temporada de lluvias, y conforme los van encontrando, identifican el tipo de hongo y optan por recolectar los hongos que ya conocen a la perfección, este conocimiento es transmitido de generación en generación y no se arriesgan con algún otro desconocido, al menos que expertos aporten algún conocimiento micológico sobre las especies.

Los recorridos en los bosques de la comunidad para la recolección de hongos silvestres nos llevaron a la preparación del empapelado de hongos. De las experiencias de las cocineras se suele quitar en primer lugar la tierra con un trapo limpio (Foto 2). En el empapelado se extiende un papel aluminio cortado de acuerdo con las dimensiones del sombrero del hongo (considerando que se va a empapelar) y se le unta mantequilla a la parte del aluminio donde irán todos los ingredientes (Foto 3), entonces va el sombrero con las láminas del hongo hacia arriba y en seguida se le pone suficiente queso deshebrado con epazote (Foto 4). Posteriormente se vierten algunas cucharadas de aderezo de mayonesa con chipotle (Foto 5), se le pone más queso a lo largo dos tallos del hongo que en esta ocasión fue con “nanacate rojo” o también llamado comúnmente como “tecomate” u “hongo de yema” (*Amanita basii*) (Foto 6). Se coloca otro sombrero encima, este con las láminas hacia abajo (Foto 7), se cierra el empapelado (Foto 8) de manera que quede envuelto y sellado sin apretar, pues debe fundirse.





Figura 9. Empapelado con hongos (especie *Amanita basii*)
Fuente: propia

Ya para cocinar se debe asar en el comal a flama media y con ayuda de una pala de madera se voltea tres veces en periodos de tres minutos aproximadamente para que se cueza parejo (Foto 9). Señaló la cocinera Marta C. que nunca podemos tener dos hongos del mismo tamaño. También para no usar aluminio se puede hacer en hoja de plátano y se pone a hervir como tamal (al baño maría). Sin embargo, con la práctica, sabe más delicioso en empapelado con aluminio, ya que como es asado y a la vez se funde el quesillo, se concentran más los sabores, en donde el aderezo toma más consistencia de salsa ligeramente ahumada y con un sabor muy rico y hogareño (Foto 10). Cuando se ha hecho la prueba con hoja de plátano, no resiste a la lumbre y se rompe. El precio de este platillo tradicional con hongos está en \$70. 00 M.N.

Otro platillo fue la trucha empapelada con hongos. Las truchas las pescan las cocineras con una pequeña red. Ya de regreso al comedor (Foto 2), se ofrece té de poleo, café y chocolate caliente de agua o de leche. Se prefirió por este último acompañado de pan serrano de trigo con avena (Foto 3). Por otra parte, ya al momento de limpiar la trucha, se le hizo una incisión con un cuchillo pequeño de sierra en la parte de enfrente del pescado para poderle retirar las agallas y las vísceras, posteriormente se limpió al chorro con agua, se le quitan las escamas y se realizaron tres cortes inclinados en las partes laterales y se enjuagó completo.

Para la preparación se utilizaron hongos “pancita” que es la especie *Boletus sp.* (Foto 4), se corta cebolla y jitomate en cubos pequeños (Foto 5), y se reserva, pues primero se extiende papel aluminio previamente cortado acorde a las medidas que se hará el empapelado y se pone en medio el pescado condimentándolo por todos sus lados, tales condimentos venían ya mezclados en un salero, pero comentó que son una mezcla de sal, orégano y consomé en polvo. Después se le vierte la



cebolla, el jitomate y en seguida hoja santa (Foto 6). Mientras tanto los hongos de “pancita”, se hidratan con agua caliente en un plato hondo durante dos minutos aproximadamente y se agregan a la preparación (Foto 7), finalmente se envuelve en el papel aluminio (Foto 8), de manera que quede bien sellado, pues se va a cocinar en la plancha por ambos lados para que se cueza parejo, concentrándose así sus sabores, sin que se salgan del empapelado los jugos de los ingredientes. Se sirve en un plato de loza, acompañado de arroz, limón, tostadas, salsa picante y aderezo enchipotlado (Fotos 9,10, 11 y 12).





Figura 10. Trucha empapelada con hongos
Fuente: propia

Por último, en la comunidad de San Antonio Cuajimoloyas existen diversas estrategias de promoción de los conocimientos tradicionales en los usos gastronómicos de hongos silvestres comestibles. Por ejemplo, las mujeres cocineras se organizan en grupos dedicados a la producción, envasado y comercialización de hongos silvestres en conserva y deshidratados, como el grupo de “manos Oaxaqueñas” y “Sierra viva”. Dentro de los productos de alimentos que comercializan están los hongos en escabeche y las mermeladas (Fotos 1 y 2), frutas deshidratadas y hongos deshidratados como se aprecia en las siguientes fotografías (Fotos 3, 4 y 5).



Figura 10. Mermeladas y hongos deshidratados
Fuente: propia



Todo el proceso de envasado es completamente hecho a mano y sin el uso de maquinaria. La esterilización de los frascos se realiza poniéndolos a hervir y los alimentos que serán envasados los elaboran en sus fogones, como mermeladas, hongos en escabeche, chiles en vinagre y demás productos. Es necesario señalar que en cuanto a la nomenclatura de algunas especies de hongos silvestres que se mencionan en este trabajo, son parte de la promoción que se hace a través de carteles que permiten la identificación de hongos de la Sierra Juárez del estado Oaxaca. Este tipo de materiales se han convertido en una guía para las propias cocineras tradicionales que les permite una mejor identificación de hongos, ya que contiene los nombres de las especies de los hongos en la nomenclatura científica, en lengua zapoteca y en la nomenclatura común (en español), con sus respectivas fotos.

Conclusiones

Este artículo se propuso mostrar los diversos conocimientos y las prácticas tradicionales en los usos gastronómicos de los hongos silvestres en las experiencias de mujeres cocineras tradicionales de la comunidad de San Antonio Cuajimoloyas, Oaxaca. Podemos concluir que estas prácticas que van desde la recolección de los hongos silvestres en canastas de carrizo, la preparación de platillos tradicionales y la presentación de los mismos conllevan una mayor valorización de trabajo que realizan las mujeres cocineras tradicionales en términos económicos, pero también en términos naturales y de reforzamiento de la identidad cultural.

Cabe señalar que a las dificultades que enfrentan las mujeres en general en la lucha por la equidad y mejores condiciones de vida se enfatiza la heterogeneidad del sector, en donde las mujeres indígenas enfrentan más las limitaciones específicas de sus lugares de origen, de las culturas de sus grupos étnicos, de las condiciones de las comunidades en donde habitan, relegadas al cumplimiento de roles femeninos que se les asignan, como por ejemplo, al interior de los hogares en el trabajo doméstico, el cuidado de los otros, de los hijos, los enfermos, de personas de la tercera edad pero escasamente son reconocidas en el fortalecimiento de la cultura, en la gestión de los recursos naturales.

Entonces no se trata solo de vender un platillo tradicional con hongos silvestres, sino de vencer las prohibiciones culturales que les niegan el reconocimiento y violan sus derechos individuales y colectivos a nivel comunitario. De ahí la importancia mostrar esos conocimientos y las prácticas tradicionales que tienen y que han sido transmitidas por generaciones anteriores en donde se resisten al uso de los utensilios modernos que, si bien pueden ser mucho más prácticos y rápidos, son parte de sus tradiciones y saberes ancestrales. Es posible concluir también que las



nuevas generaciones de jóvenes no recuperan esos conocimientos tradicionales en la gastronomía de los hongos, lo que hace importante recuperar las estrategias que realizan las cocineras tradicionales participantes del proyecto como son los talleres o cursos para promover la importancia de la cultura alimentaria.

En la discusión fue posible identificar los contenidos de estos talleres en donde se muestran las formas adecuadas de recolectar los hongos, el uso de utensilios, los ingredientes, la preparación y el servicio al comensal. Además, se mostraron los métodos de conservación de hongos silvestres en donde se incluye la preparación de mermeladas con hongos, frutas como guayaba, mango, pera y manzana, sea con hongos silvestres frescos o deshidratados. El valor agregado es aprovechar los recursos y obtener una ganancia, ya sea de manera monetaria o para consumo de sus propias familias. Por ello, se organiza en los últimos años una feria de hongos para difundir y vender sus platillos que son parte de la cultura y la cocina tradicional de San Antonio Cuajimoloyas.

Agradecimientos

Nuestro total agradecimiento y respeto a las cocineras tradicionales de San Antonio Cuajimoloyas: Merced J., Bélgica L., Martha L., Marta C., María Teresa B. y Daniela M.

Referencias

- Estrada, E. (2008). Aspectos históricos de un camino colorido. En Llanderal, C., D. H. Zetina, A. L. Vigueras y L. Portillo (eds.), *Grana cochinilla y colorantes naturales* (pp. 2-5). Colegio de Postgraduados.
- Isokauppila, T. (2019). *Hongos Curativos-Guía práctica y culinaria sobre el uso de los hongos para alcanzar la salud integral*. Gaia Ediciones.
- Jiménez, K. (2022). *Uso de hongos silvestres comestibles de la reserva "El Huitepec" en la cocina chiapaneca* (tesis de licenciatura, Universidad de ciencias y artes de Chiapas). Repositorio UNICACH. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/4306>
- Jiménez, M., Pérez, J., Almaraz J. & Torres, M. (2013). Hongos silvestres con potencial nutricional, medicinal y biotecnológico comercializados en Valles Centrales, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(2), 199-213. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v4n2/v4n2a2.pdf>
- Pérez, L., Aguirre, E., & Cifuentes, J. (2019). Los hongos macroscópicos. *Arqueología Mexicana*, 87, 20-30.
- Román, N. (2015). *Revaloración de los hongos silvestres comestibles del bosque mesófilo de montaña y su importancia en el desarrollo forestal sustentable* (tesis de maestría, Colegio



de Postgraduados). Repositorio institucional COLPOS. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/2794>

Valladares, L., & Olivé, L. (2015). ¿Qué son los conocimientos tradicionales? Apuntes epistemológicos para la interculturalidad. *Revista Cultura y representaciones sociales*, 10(19), 61-101. <https://www.scielo.org.mx/pdf/crs/v10n19/v10n19a3.pdf>

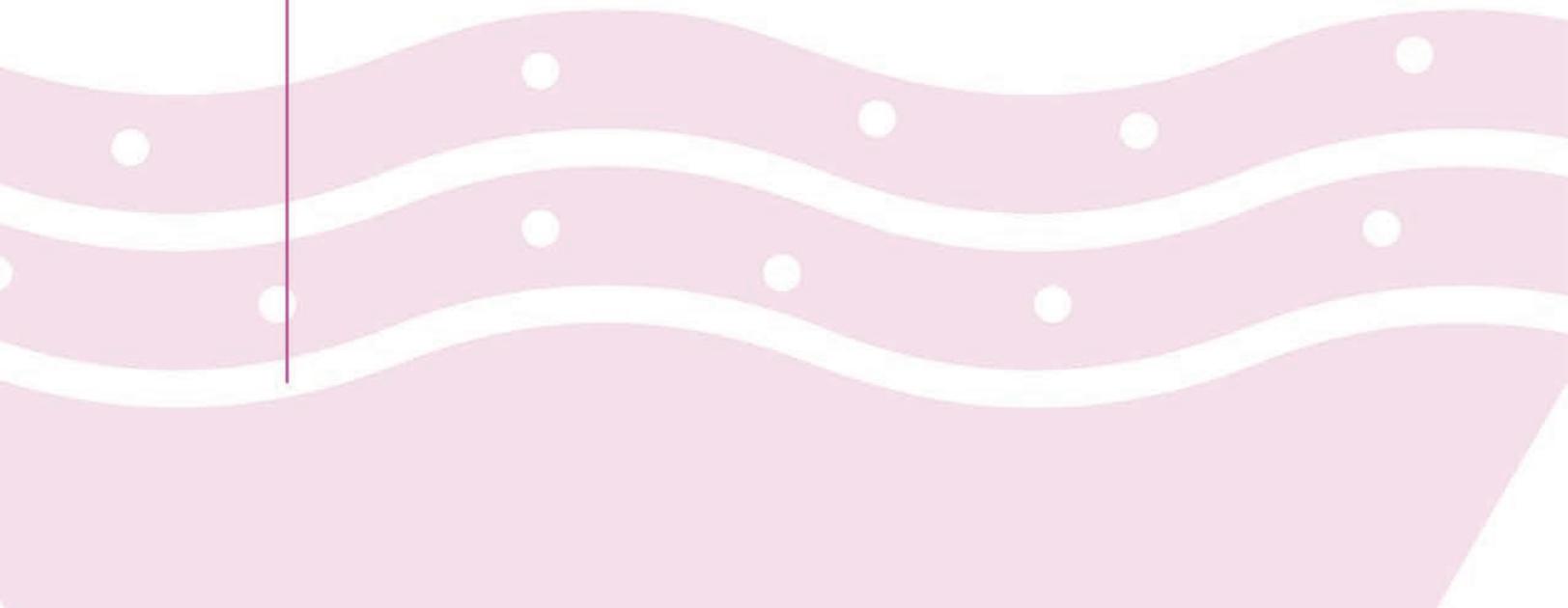
Villegas, F., López, I. & Fonseca, R. (2023). El hábitat de los hongos y su vulnerabilidad ante el cambio climático. *Revista Enseñanza y Comunicación de las Geociencias*, 2(2), 33-37. <https://doi.org/10.22201/cgeo.29928087e.2023.2.2.7>





SOCIEDAD Y SISTEMAS AGROALIMENTARIOS





Hacia el concepto de afectaciones neuropsicosociales por la agroindustria en las niñeces rurales

David Sánchez Sánchez^{1*} y Mariana Vianey Quiroz Romero²

¹Investigador Posdoctoral CONAHCYT- UDG, Maestría en Gestión y Desarrollo Social

²Estudiante de Licenciatura en Psicología, Centro Universitario de Ciencias de la Salud, Universidad de Guadalajara

*Autor de correspondencia: david.sanchez@academicos.udg.mx

Resumen

Palabras clave:

agroquímicos, infancias, neurodesarrollo, vulnerabilidad.

El objetivo del trabajo es analizar algunas de las consecuencias derivadas de la exposición a agroquímicos en comunidades rurales de América Latina, con un enfoque en el impacto sobre el neurodesarrollo infantil y las implicaciones sociales y de salud pública. El estudio integra enfoques de neuropsicología, psicología social y psicología rural, evaluando cómo los factores biológicos y sociales interactúan, proponiendo la necesidad de un nuevo enfoque de análisis. La metodología utilizada para este artículo se basó en una investigación documental de revisiones previas para identificar patrones comunes en contraste con observaciones de campo exploratorias. Se realizó un análisis de la literatura, abarcando datos clínicos, epidemiológicos, revisiones legales y estudios de caso en áreas agroindustriales. Los resultados sugieren un impacto negativo significativo en el neurodesarrollo con una relación directa a la exposición de agroquímicos, lo cual está relacionado con impacto psicosocial que deriva en vulnerabilidad debido a factores estructurales. Las conclusiones subrayan la necesidad urgente de un enfoque transdisciplinar que aborde tanto las causas biológicas como las condiciones socioeconómicas de las comunidades afectadas, proponiendo para ello el concepto de Afectaciones Neuropsicosociales.

Introducción

La psicología como ciencia, estudia la conducta humana desde varios puntos de partida, cada uno con un enfoque complejo en búsqueda de los orígenes del comportamiento. Entre estas podemos encontrar dos disciplinas que, aunque comúnmente divididas por su perspectiva y metodología, tienen el mismo objetivo psicológico de entender y estudiar la conducta: la neu-

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 157-178.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14712425>

Recibido: 16 de octubre 2024
Revisado: 12 de noviembre 2024
Aceptado: 13 de enero 2025
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



ropsicología y la psicología social. Es así que podemos explicar, a grandes rasgos, que la neuropsicología se centra en los aspectos cognitivos y las funciones cerebrales. Y, por otro lado, la psicología social se enfoca en cómo las interacciones sociales y el contexto socio cultural e histórico moldean el comportamiento. A pesar de sus núcleos de estudio, encontramos que, en ambas, sea en psicología social o en neuropsicología, predomina una visión urbanocéntrica para comprender las situaciones que viven las personas en territorios rurales (Batista, 2001), por lo que se requiere, con igual relevancia, la aproximación desde una psicología rural, que en la última década se viene construyendo en Latinoamérica (Landini, 2015).

El interés por encontrar a las disciplinas juntas proviene de la necesidad de reconocer que las alteraciones neurocognitivas presentes en las niñas rurales actuales no existen aisladas de las situaciones sociales en que se desenvuelven. Así como se puede inferir que el comportamiento social es afectado por la cognición, también podemos considerar que las dinámicas sociales influyen en el funcionamiento cognitivo y están condicionadas por las interacciones propias de la vida rural. Esto implicaría un nuevo enfoque que va más allá de una visión reduccionista que limita el análisis singular de las características neurocognitivas o el contexto social. En su lugar, se requiere darle la importancia a una perspectiva más compleja, que considere la interacción dinámica y de diálogo entre lo cognitivo, lo social y lo rural, para obtener una comprensión más profunda y completa del comportamiento humano y los orígenes de sus posibles alteraciones.

El fenómeno elegido para hablar de la importancia de esta integración desde un enfoque transdisciplinario se observa en el neurodesarrollo infantil en zonas agroindustriales. El caso en específico del que parten las indagaciones, es la Zona Ixtlahuacán del Río-Cuquío, Jalisco (Sánchez, 2020, Sánchez, 2023); la cual ha tenido en las últimas décadas un desarrollo agroindustrial, principalmente enfocado en el monocultivo de maíz y más recientemente en el cultivo de chía, agave, limón, aguacate y algunos cultivos de invernadero como berries, chiles, jitomate, etc. El periodo de monocultivo de maíz se puede asociar a la llamada revolución verde, que impacta la zona desde hace varias décadas, mientras que las recientes incursiones en otros cultivos vienen de la búsqueda de nuevas opciones productivas impulsadas por una estrategia gubernamental conocida como “Jalisco Gigante Agroalimentario” (SEDER, 2014), asociada a las nuevas formas del régimen agroalimentario neoliberal (Otero, 2013) que provocan nuevas formas de agroextractivismo (McKay et al., 2022).

En la localidad de Palos Altos, municipio Ixtlahuacán del Río, en 2009 comenzó el proyecto de Caracol Psicosocial, y desde entonces ha trabajado principalmente con niñas, juventudes y mujeres. Durante estos años se ha logrado una comprensión más profunda de las afectaciones de la agroindustria para la comunidad. Respecto



al monocultivo y sus efectos, se tienen documentadas varias situaciones, entre las que destaca el reconocimiento de que en la parte con mayor actividad agrícola de la zona existen también registros oficiales de mayor incidencia de cáncer, además que el grupo de edad con mayor tendencia al crecimiento de casos son las juventudes (Sánchez, 2023). Si bien la correlación no implica causalidad, tampoco se puede negar que tendría que ser de interés académico-científico investigar estos fenómenos. Así como tendría que ser de interés social y político-público actuar bajo el principio precautorio ante la sospecha de afectaciones. Las recientes investigaciones de CIESAS y UDG en la cuenca de Chapala y Autlán (Sierra Díaz et al., 2019) que detectaron presencia de agroquímicos en sangre y orina de niños son evidencias para asumir que el caso en Palos Altos tendría que ser igual, por la similitud de los contextos y las problemáticas.

Particularmente en la zona de Ixtlahuacán del Río y Cuquío, en los años 2017 a 2019 hubo un alza significativa en las fumigaciones con avioneta en el temporal de julio y agosto. La dispersión o deriva de agroquímicos con esta técnica es mayor por el viento y la altura a la que son soltados y por lo tanto su afectación a la salud puede ser mayor (Kaczewer, 2006). Las fumigaciones se dieron a pocos metros de las casas y las escuelas, por lo que se puede inferir que hubo una mayor exposición en esos años durante las semanas que duraban las aplicaciones, también se reportaron algunos síntomas de intoxicaciones agudas, además se observó la práctica de quemar los botes ya vacíos en las afueras de la comunidad. Algunos de los productos aplicados son de etiquetas amarillas, naranjas y rojas, las más peligrosas según los sistemas de clasificación mexicanos. Las niñas y niños que se gestaron o nacieron en esos años actualmente se encuentran en edad escolar; es decir que sus primeros años de vida estuvieron expuestos a fumigación con avionetas. Aunado a que las fumigaciones siguen año con año, aunque ahora se utilizan drones que disminuyen la deriva en comparación con las avionetas; sin embargo, la exposición sigue siendo sistemática cada verano. El trabajo continuo con niñas y niños y la interacción con sus padres y madres permite reconocer que existe una creciente preocupación en los contextos escolares por la persistente dificultad en la atención, conductas de agresividad, falta de control de impulsos, entre otras conductas que sugieren clínicamente alguna alteración de neurodesarrollo.

En este contexto, resulta insuficiente comprender el comportamiento de las niñas únicamente desde una perspectiva neurobiológica, o más particularmente, entender el crecimiento (en la percepción de padres, profesores y psicólogos) de casos de niñas y niños con dificultades escolares asociadas a cuestiones neuropsicológicas. Para evitar caer en una explicación única desde la psicología clínica o la neuropsicología, es necesario dialogar transdisciplinariamente con un enfoque



que considere las influencias estructurales derivadas de la dinámica agroindustrial a muchos espacios rurales, como la exposición frecuente y constante a agroquímicos, productos comúnmente utilizados en la agroindustria que pueden afectar negativamente el neurodesarrollo infantil.

Los agroquímicos llegan a alterar las capacidades cognitivas, pero también impactan las interacciones sociales y el bienestar general de los niños (Moreno, & López, 2005). Además, la falta de interés de varios agentes, por un desarrollo apto y una educación integral de calidad en estas zonas, amplía el impacto de estas consecuencias. Por lo tanto, se requiere una perspectiva que combine tanto los aspectos neuropsicológicos como los psicosociales y urbanos para ofrecer una visión más integradora de las implicaciones del entorno en el desarrollo infantil de infancias rurales (Rozas, 2021).

Integrar estos enfoques nos permitiría abordar, desde una visión más amplia, la complejidad de las interacciones entre lo social y neurológico, indagando especialmente en los factores complejos que afectan de manera directa a las comunidades más vulneradas. A pesar de esto, este enfoque transdisciplinario enfrenta grandes desafíos, ya que la literatura académica tradicional se enfoca mayormente en una perspectiva unidimensional y urbanocentrista. En este caso, con una fuerte preferencia por la neurociencia, mayormente aceptada en los círculos académicos e institucionales. No obstante, cada vez existe un mayor interés en investigaciones de esta índole con una perspectiva amplificada, que incluye los enfoques sociales y biológicos (Rozas, 2021, Caletti, 2021).

Reiterando, cuando se trata del uso de agroquímicos, la integración de estas disciplinas resulta imprescindible. Ahora, se observa un creciente interés por analizar los efectos de los productos químicos desde las repercusiones sociales y la salud pública, más allá de un punto de vista biológico (Sierra Diaz, et al., 2019). Este cambio refleja una re-evolución en la forma en que se abordan estos problemas, reconociendo que las razones para estudiar el impacto de los agroquímicos trascienden las respuestas biológicas simples. Se trata de comprender el contexto, considerando tanto los efectos neurológicos de la exposición a agroquímicos como las implicaciones socioculturales de vivir en entornos con prácticas agrícolas (Yañez, 2020).

Esta propuesta no solo podría fortalecer las bases para la investigación en temas neuropsicosociales, sino que también abre nuevas puertas para abordar de forma más trascendental los problemas complejos que las comunidades se enfrentan. Entender las afectaciones desde la complejidad del contexto social y cómo permite que se perpetúen las condiciones adversas es crucial para comprender cómo el entorno influye en el desarrollo neurológico de las personas. Por ello, se vuelve indispensable una revisión de los conceptos y los estudios previos para identificar cómo se han



analizado hasta ahora las afectaciones neuropsicosociales y hacia dónde se puede dirigir el interés para el estudio de estas problemáticas, más allá de solo encontrar el porqué. Este enfoque integrador permitirá no solo encontrar la posible causalidad y analizar los problemas con mayor precisión, sino también desarrollar soluciones que aborden en su totalidad y de manera efectiva las causas intrínsecas de las problemáticas en las comunidades rurales.

Los efectos de los agroquímicos en el Sistema Nervioso Central

Para la agroindustria, el uso de agroquímicos ha sido un elemento indispensable para aumentar la producción de alimentos. Resultó como una respuesta a la necesidad de controlar plagas, la cual surgió por la falta de diversidad en los cultivos con la agricultura moderna. Las tendencias hacia el monocultivo se originan en la búsqueda de una falsa “eficiencia” productiva, que permitiera la producción masiva de alimentos, sin darle la importancia a las consecuencias ecológicas y sanitarias que esto ocasiona. Obteniendo como resultado la creación de productos químicos muy efectivos diseñados para eliminar las plagas, con el propósito de tener una mejor cosecha, ignorando las repercusiones de salud pública, particularmente asociadas a las consecuencias en el Sistema Nervioso Central (SNC). Ya que los agroquímicos contienen sustancias neurotóxicas que, tras una exposición frecuente y constante, generan efectos graves en las funciones neurológicas (González, Ramírez, García, 2022).

Se puede encontrar que la exposición a agroquímicos tiene una manifestación sintomatológica visible e incapaz de ignorarse, la cual se nombra como un daño neurológico agudo. Explica Claudine Uwamahoro et al. (2024) que los trabajadores agrícolas y personas que viven cerca de campos donde se aplican pesticidas y herbicidas pueden experimentar una larga lista de síntomas inmediatos de intoxicación. Algunos síntomas distinguidos por las características neurológicas involucradas a su aparición, como lo son los dolores de cabeza, náuseas, confusión e incluso convulsiones. Esto se explica por la existencia de compuestos tóxicos, como los organofosforados, los cuales inhiben la enzima acetilcolinesterasa, lo que provoca la acumulación de acetilcolina en el cerebro y el sistema nervioso periférico, interfiriendo en la comunicación neuronal (Claudine Uwamahoro, et al. 2024). En los casos más graves, esta exposición puede desencadenar parálisis, coma o incluso la muerte. Estas intoxicaciones son una clara representación del daño que los agroquímicos pueden causar al SNC.

De igual forma, cuando se cuestiona la exposición inmediata, podemos cuestionar el daño neurodegenerativo a largo plazo por la exposición crónica a agroquímicos. Se encuentra en estudios previos de Qasim, Khan y Mallhi (2021), que existe una relación entre ciertos pesticidas y el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas



como el Parkinson y el Alzheimer. Por ejemplo, el “paraquat”, un herbicida común, ha sido asociado con el daño a las neuronas dopaminérgicas, involucradas en la regulación del movimiento, aumentando así el riesgo de padecer Parkinson. Del mismo modo, la exposición prolongada a productos químicos tóxicos puede contribuir a la formación de placas amiloides, un rasgo distintivo de la enfermedad de Alzheimer. Estos efectos no solo afectan a los trabajadores agrícolas, sino también a las poblaciones que viven en áreas rurales donde estos productos son utilizados por fumigación aérea y que a largo plazo involucra un daño neurocognitivo inminente (Qasim, Khan, & Mallhi, 2021).

Si se contempla que la exposición prolongada involucra efectos nocivos a la salud, en las infancias es una preocupación por el impacto que pueden llegar a tener durante su neurodesarrollo infantil. Esto se entiende mejor al comprender que el sistema nervioso de las niñeces está en pleno desarrollo, haciéndolos especialmente susceptibles a los efectos de los químicos en el ambiente, creando un contexto vulnerador hacia ellos. Varios estudios han demostrado que la exposición prenatal o durante la primera infancia a agroquímicos puede tener consecuencias graves en el desarrollo cognitivo y emocional de los niños. Se ha vinculado el Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH), Trastorno Negativista Desafiante, dificultades de aprendizaje y Trastorno del Espectro Autista (TEA) a la exposición a agroquímicos (Bjørling-Poulsen, et al, 2008; Hidalgo, 2022). Concibiendo que este tipo de exposición no solo afecta al cerebro en desarrollo, porque como explica la Agencia Ambiental Europea (2023): “la exposición compromete el bienestar a largo plazo de los niños”, perpetuando ciclos de vulnerabilidad en áreas rurales afectadas por las prácticas intensivas, promovidas y poco atendidas por la falta de un enfoque sistematizado de interés por los actores político, socioeconómico y culturales en el mundo.

Además de estos efectos a largo plazo, los agroquímicos también causan alteraciones en la comunicación neuronal, afectando las funciones de memoria y aprendizaje. Esto sucede al momento en que los neurotransmisores colinérgicos se ven alterados, ocasionando una falta de transmisión de señales entre neuronas. La falta de conexión también puede explicar los cambios del estado de ánimo y comportamiento por la afectación en los niveles de dopamina y serotonina. Afectando así a los que están expuestos de manera crónica y a los que tienen un contacto intermitente, pero constante con estos químicos, como sucede en muchas áreas rurales. (Claudine Uwamahoro, et al., 2024). Un ejemplo llega a ser en Ixtlahuacán del río y Cuquío, comunidades expuestas directa e indirectamente.

Una nota importante es que la exposición crónica a agroquímicos también está asociada con un aumento de la inflamación cerebral. La exposición prolongada desencadena una respuesta inflamatoria en el cerebro, afectando tanto a las neuro-



nas como a las células gliales. Esta inflamación crónica puede acelerar el deterioro cognitivo y contribuir a enfermedades neurodegenerativas, incrementando la vulnerabilidad del sistema nervioso a futuros daños (Bjørling-Poulsen, et al., 2008). Aclarando con todo esto que la exposición a agroquímicos es un factor de riesgo persistente y constante en las comunidades rurales, en donde todos están expuestos.

Neurodesarrollo de las niñas

El neurodesarrollo es un proceso que comienza en la etapa prenatal y continúa durante la infancia y adolescencia. Siendo así etapas complejas y críticas ya que, durante estas, el cerebro de los niños experimenta un crecimiento y maduración que influyen en su capacidad para aprender, interactuar y regular sus emociones. Este desarrollo depende de una amplia serie de factores genéticos y ambientales que, al interactuar entre sí, moldean el sistema nervioso (Shonkoff, & Phillips, 2000).

Este proceso está guiado mayormente por la genética. Levitt (2003) comprende que la genética regula los procesos como el crecimiento neuronal, la formación de sinapsis y la mielinización y entiende que son fases fundamentales para el funcionamiento adecuado del cerebro. Por lo que, durante los primeros años de vida, las conexiones sinápticas aumentan de manera rápida, lo que permite esa gran plasticidad cerebral característica de las infancias, siendo el cerebro más receptivo a influencias externas positivas y negativas.

Podemos decir que el ambiente en el que se desarrolla un infante tiene un impacto significativo en su neurodesarrollo. Existen varios factores como el apego seguro, la estimulación cognitiva adecuada y un entorno emocionalmente estable son fundamentales para un neurodesarrollo saludable. La falta de estos factores puede llevar a alteraciones en el desarrollo emocional y cognitivo del niño. Además, Gunnar y Quevedo (2007) sostienen que el estrés temprano en la vida, como la exposición a violencia doméstica o el abandono emocional, puede alterar el desarrollo cerebral, afectando la regulación emocional y las habilidades cognitivas.

Es gracias a estos entendimientos de que la crianza y el contexto en donde se desarrolla el infante puede entenderse que la exposición a sustancias tóxicas, como agroquímicos, es uno de los desafíos más graves para el neurodesarrollo infantil (Lanphear, et al., 2005). Como se reconoce anteriormente, la exposición a estos compuestos puede provocar diferentes dificultades y problemáticas, siendo un factor de los muchos, muy importante. Sobre todo, en la etapa donde se encuentran las infancias al tener claro que implica un mayor riesgo por la exposición temprana de estos productos neurotóxicos y su normalización en el uso. Persistiendo esta problemática en las infancias rurales por el mismo contexto en el que gestan y desarrollan (Bjørling-Poulsen, et al. 2008).



Complejidad del contexto agroindustrial

Cuando se habla de la agroindustria, se entiende como un pilar fundamental para la economía de varias zonas actuales en México en general. Podemos observar su crecimiento por la nueva “necesidad” económica de expansión, responsable de la producción masiva de alimentos que sostienen al comercio. Sin embargo, la expansión de este sector está rodeada de desafíos complejos que trascienden los límites de la agricultura tradicional. El contexto agroindustrial no solo abarca la producción masiva de productos agrícolas, sino que también debe contemplar las consecuencias sociales, económicas y ambientales que deben ser abordadas de manera integrada.

Uno de los rasgos más destacados de la agroindustria moderna es la tendencia hacia el monocultivo. Este implica el cultivo intensivo y militante de una sola especie vegetal o de semilla en grandes extensiones de tierra durante períodos prolongados. Aunque esta práctica pueda verse como un aumento de eficiencia productiva y una forma más fácil de mecanizar los cultivos, trae consigo consecuencias ecológicas significativas. La falta de diversidad a causa de los monocultivos genera un impacto en todo lo que rodea, agotando los nutrientes del suelo y aumentando la vulnerabilidad a plagas y enfermedades, lo que explica la dependencia, cada vez mayor, a agroquímicos como pesticidas y fertilizantes (Altieri & Nicholls, 2017).

Esta dependencia de agroquímicos es problemática. Los pesticidas, diseñados para combatir plagas y aumentar el rendimiento, tienen efectos adversos no solo en el medio ambiente, sino también en la salud humana. Las sustancias químicas aplicadas a gran escala se infiltran en el suelo, el aire y las fuentes de agua, afectando a las comunidades locales, especialmente en zonas rurales donde la exposición es más intensa. Así explican Grandjean y Landrigan, (2006) que los residuos de estos químicos en alimentos y la contaminación ambiental están vinculados a problemas de salud como enfermedades respiratorias, trastornos del neurodesarrollo y hasta enfermedades crónicas como el cáncer.

El modelo agroindustrial, aparentemente eficaz en términos de producción, ha distinguido las desigualdades socioeconómicas en las comunidades rurales. Los pequeños agricultores, que solían practicar una agricultura diversificada, han sido presionados a adoptar monocultivos orientados al mercado global, lo que los hace dependientes de insumos industriales (semillas, pesticidas, fertilizantes) y vulnerables a las fluctuaciones del mercado (McMichael, 2009) y del suelo.

Además, el trabajo agrícola en el contexto agroindustrial es a menudo precario y mal remunerado, lo que afecta directamente a las condiciones de vida de los trabajadores rurales. En muchas regiones las condiciones laborales en los cultivos agroindustriales no cumplen con los estándares de seguridad, lo que pone en mayor riesgo la salud de los trabajadores.



Otro de los grandes desafíos del contexto agroindustrial es la sostenibilidad ambiental. La deforestación y la conversión de ecosistemas naturales en tierras agrícolas están entre las principales causas de la pérdida de biodiversidad a nivel mundial (Tilman & Clark, 2014). La expansión de la frontera agrícola, impulsada por la demanda global de productos como la soja, el aceite de palma y el maíz, ha reducido significativamente la cantidad de hábitats naturales disponibles para las especies silvestres. Esta pérdida de biodiversidad no solo afecta al equilibrio ecológico, también contribuye a la crisis climática. La agricultura industrial es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, debido a la deforestación, el uso intensivo de fertilizantes y la maquinaria agrícola pesada que consume combustibles fósiles (Pretty, 2008). Además, el manejo inadecuado de residuos agrícolas y la quema de pastizales son prácticas comunes en algunos sectores agroindustriales que exacerban la degradación ambiental.

A medida que crece la conciencia sobre los efectos adversos de la agroindustria, ha habido un impulso creciente hacia la regulación y políticas sostenibles, especialmente en zonas de interés político. Un ejemplo es la Unión Europea, según la Comisión Ambiental Europea (2020), ha implementado estrategias como el Pacto Verde Europeo y la estrategia "De la granja a la mesa", que buscan reducir el uso de pesticidas, promover la agricultura orgánica y restaurar la biodiversidad. Estas iniciativas son pasos importantes para mitigar el impacto ambiental de la agroindustria y mejorar las condiciones sociales de los trabajadores agrícolas.

La implementación de regulaciones más estrictas enfrenta una fuerte oposición de los actores industriales que dependen de los monocultivos y los agroquímicos, gracias a que es un medio poco retribuido y altamente exigente para quienes lo realizan. Además, las disparidades globales en la implementación de estas políticas significan que mientras algunos países intentan realizar un cambio hacia la sostenibilidad, especialmente países europeos que de igual forma se ven beneficiados por las prácticas en Latinoamérica, otros continúan utilizando prácticas agrícolas intensivas que ponen en peligro tanto al medio ambiente como a las poblaciones locales, como sucede frecuentemente en América Latina.

La implementación de regulaciones más estrictas enfrenta una fuerte oposición de los actores industriales que dependen de los monocultivos y los agroquímicos, gracias a que es un medio poco retribuido y altamente exigente para quienes lo realizan. Además, las disparidades globales en la implementación de estas políticas significan que mientras algunos países intentan realizar un cambio hacia la sostenibilidad, otros continúan utilizando prácticas agrícolas intensivas que ponen en peligro tanto al medio ambiente como a las poblaciones locales (Nogar & Larsen, 2014).



El contexto agroindustrial es un fenómeno complejo que no puede ser abordado de manera aislada. Su intersección con factores ambientales, sociales y económicos genera desafíos multifacéticos que requieren soluciones integrales. Si bien la agroindustria ha permitido la producción masiva de alimentos para la alimentación mundial excesiva, es crucial reconocer y abordar sus impactos negativos en el medio ambiente y dentro de las comunidades rurales que realizan ejercen esta profesión.

Material y Método

Este artículo integra dos procesos de investigación documental que actualmente están en curso, los cuales son complementarios. Primeramente, la revisión de estudios que abordan las diferentes afectaciones causadas por la exposición a agroquímicos en comunidades rurales de América Latina, que posteriormente se trata de focalizar en investigaciones que exploran tanto los efectos neurotóxicos en el desarrollo cognitivo y motor como el impacto psicosocial en familias y trabajadores agrícolas.

La variedad de textos revisados se centró en los siguientes aspectos: efectos neuropsicológicos de los plaguicidas en infancias, consecuencias psicosociales en las comunidades por los riesgos en la agroindustria relacionadas a agroquímicos, factores estructurales que aumentan la prevalencia de trastornos o enfermedades por el uso de agroquímicos y la relación entre la exposición temprana y el aumento de trastornos.

Asimismo, se revisaron textos que identifican riesgos para la salud asociados con la exposición a agroquímicos, como las afectaciones renales. Estos textos, que incluyen afecciones como enfermedades renales y otras situaciones médicas, se utilizaron para sustentar y desde ahí inferir posibles afectaciones a otros niveles, como el neurodesarrollo infantil.

A otro nivel, para la elaboración del artículo se requirió una revisión de textos para la contextualización de los hallazgos clínicos de los artículos, desde una perspectiva más amplia que incluye lo psicosocial, lo territorial y lo estructural.

Posteriormente se llevó a cabo un análisis crítico de la literatura para identificar las tendencias y hallazgos comunes entre los estudios; para poder proporcionar una visión integral y proponer la idea de las afectaciones neuropsicosociales en las comunidades rurales expuestas a agroquímicos, tratando de relacionar lo revisado con las primeras exploraciones empíricas derivadas del trabajo con niñas que se tiene en la zona Ixtlahuacán del Río-Cuquío, Jalisco; aunque estos datos empíricos aún no se exponen aquí por rebasar el objetivo de este texto.

Resultados

El análisis de lo revisado en diversas investigaciones y otros textos de América Latina pone de manifiesto las múltiples afectaciones derivadas de la exposición a



agroquímicos en comunidades rurales, particularmente en el neurodesarrollo infantil. Estas afectaciones no solo involucran daños neurológicos, sino también impactos profundos en el bienestar psicosocial de las poblaciones afectadas. Se ha identificado un patrón claro de afectaciones graves, que sugiere la necesidad de adoptar un enfoque integral para proteger la salud pública de las comunidades expuestas desde una posición de interés público y político.

Efectos Neurotóxicos

El factor clave de este tema y en la zona agroindustrial que se determina en las afectaciones neuropsicosociales de las comunidades rurales es la exposición prolongada a plaguicidas y agroquímicos. Los estudios coinciden con que los pesticidas organofosforados y organoclorados, ampliamente utilizados en la agroindustria, tienen efectos devastadores sobre el sistema nervioso central, particularmente en niños. Pérez Carrera, Moscuza, y Fernández-Cirelli (2008) señalan que estos productos interfieren en el desarrollo neurológico, afectando la maduración de las conexiones neuronales. Las consecuencias incluyen retrasos en el desarrollo cognitivo y motor, lo que resulta en una mayor prevalencia de trastornos como el Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH) y los Trastornos del Espectro Autista (TEA). Trastornos en tendencia en zonas expuestas a su exposición.

Un estudio realizado en Hermosillo, Sonora, demuestra que los niños expuestos a pesticidas presentan un rendimiento cognitivo más bajo, especialmente en áreas como la memoria de trabajo y la comprensión verbal (Yañez, 2020). Estos hallazgos se comparten en otras regiones de América Latina, donde se ha documentado un impacto significativo en el rendimiento escolar y las habilidades motoras de los niños. Comprendiendo que estos efectos no se limitan a comportamientos, sino también a su capacidad motora y otras habilidades cognitivas. Entendiendo por otra parte que estas dificultades incluyen déficit de atención y problemas para procesar la información, confirmado por los estudios neuropsicológicos realizados en México por José A. Moreno y Mercedes López (2005), quienes de igual forma exponen que esto afecta negativamente su rendimiento académico y su capacidad para interactuar socialmente de manera efectiva. De la misma manera en Colombia se exploró al TDAH y el trastorno negativista desafiante reportando una asociación entre la exposición a plaguicidas y el desarrollo de síndromes neuropsiquiátricos propios de la infancia en niños del área rural (Hidalgo, et al, 2022).

Algo importante que surge de estas revisiones es que los efectos neurotóxicos no solo impactan a las infancias, sino también a las familias enteras. En una revisión de Sosinski, Franco, y Rossing (2020) subrayan que la exposición prolongada a agroquímicos también tiene un impacto negativo en la salud en general de las familias.



Muchas familias viven en condiciones de situaciones de vulnerabilidad económica, lo que les impide acceder a servicios de salud y apoyo psicológico. Sumando que la exposición a plaguicidas se asocia con síntomas de estrés crónico, depresión y ansiedad, tanto en adultos como en niños, creando un entorno complicado para el desarrollo socioafectivo y la convivencia, afectando conjuntamente a la comunidad.

Impacto Psicosocial

Además de los efectos neurotóxicos documentados, la exposición a agroquímicos genera una carga psicosocial considerable. Las condiciones de vida en las zonas rurales, muchas veces marcadas por la pobreza, el aislamiento y la falta de recursos educativos y sanitarios, perpetúan el ciclo de vulnerabilidad. Sosinski, et al. (2020) también mencionan que estas condiciones contribuyen a altos niveles de estrés, ansiedad y deterioro en las relaciones sociales, lo que refuerza la necesidad de enfoques multidimensionales en el tratamiento de las consecuencias de la agroindustria.

En este sentido se destaca que la expansión del monocultivo y la concentración de la tierra han exacerbado las disparidades socioeconómicas, generando desplazamientos de pequeños productores y desarticulando las estructuras sociales comunitarias (Domínguez, 2005). Las comunidades que dependen de la agricultura tradicional se ven empujadas hacia una economía dominada por la agroindustria, lo que incrementa su vulnerabilidad frente a las afectaciones tanto físicas como psicosociales.

Más allá de los efectos neurológicos, la exposición a agroquímicos tiene un impacto psicosocial considerable en las comunidades rurales. Las condiciones de pobreza, el aislamiento y la precariedad económica agravan los efectos físicos y contribuyen a una mayor vulnerabilidad social. Sosinski, et al. (2020) resaltan que las familias rurales que están expuestas a pesticidas de manera constante presentan altos niveles de estrés, ansiedad y depresión, lo que afecta profundamente la cohesión social y el bienestar emocional.

Un fallo judicial en la provincia de Entre Ríos, Argentina, puso de relieve los efectos que las fumigaciones con agroquímicos tienen en la salud de los niños que asisten a escuelas cercanas a las áreas agrícolas. La sentencia reconoce la vulnerabilidad de los niños y trabajadores expuestos, y subraya la responsabilidad del Estado en garantizar un ambiente saludable y seguro (Zenteno, 2019). Este tipo de sentencias resalta la importancia de adoptar medidas preventivas y correctivas para proteger la salud psicosocial de las comunidades afectadas.

Condiciones estructurales que perpetúan la vulnerabilidad

El enfoque de la determinación social de la salud, propuesto por Breilh (2013), ofrece un marco integral para entender cómo las condiciones socioeconómicas y políticas agravan las afectaciones neuropsicosociales en las comunidades rurales.



Las comunidades rurales que dependen del trabajo agrícola están atrapadas en un ciclo de vulnerabilidad estructural, donde la pobreza, la falta de acceso a servicios de salud y la desigualdad social perpetúan los efectos negativos de los agroquímicos.

Por otra parte, el enfoque ecosocial de Krieger (2001, 2002) sugiere que las desigualdades sociales y ambientales se entrecruzan. En el caso de la agroindustria, los cuerpos de los trabajadores y de las comunidades expuestas a agroquímicos y de las niñas y niños que ahí viven son marcadores de las condiciones adversas en las que se desenvuelven. Los efectos de estas exposiciones no se limitan a la toxicidad inmediata, se manifiestan en la manera en que el sistema nervioso se desarrolla y funciona, reflejando las condiciones de vida de forma física. Este enfoque dialoga con el modelo bioecológico de Bronfenbrenner, al reconocer la interacción profunda e indivisible del cuerpo humano con su medio ambiente, lo cual resulta particularmente significativo para el neurodesarrollo (Bah et al., 2023).

La exhaustiva revisión de Rozas (2021) en Latinoamérica muestra que los efectos de los agroquímicos no pueden verse de forma aislada, sino que deben analizarse dentro de un contexto más amplio que incluya las condiciones de vida de las comunidades afectadas. Los niños no solo están expuestos a sustancias tóxicas, sino que también crecen en ambientes donde no tienen acceso a diagnósticos tempranos o tratamientos adecuados, lo que agrava esta problemática en las afectaciones, creando un ciclo del problema.

A pesar de la amplia evidencia científica sobre los daños causados por los agroquímicos (Rozas, 2021; Caletti, 2021), las políticas públicas en América Latina resultan insuficientes para comprender y mitigar sus efectos. Los estudios revisados destacan la necesidad de implementar medidas preventivas más estrictas que limiten el uso de pesticidas en áreas cercanas a escuelas y zonas habitadas. El fallo en “Entre Ríos” es un ejemplo de cómo las leyes pueden alinearse con la protección de la salud pública y el medio ambiente, pero aún falta mucho por hacer para garantizar que estas medidas se apliquen en toda la región.

Además de reducir la exposición a pesticidas, es crucial que las políticas públicas aborden las condiciones socioeconómicas de las comunidades afectadas. Esto incluye mejorar el acceso a los servicios y la atención sobre los riesgos de los agroquímicos y proporcionar apoyo a las familias que han sufrido los efectos de la exposición prolongada.

Sobre la noción de Afectaciones Neuropsicosociales

Después de la revisión realizada y el análisis de las distintas investigaciones que se articulan en este texto, se pretende comenzar a plantear un concepto, abierto a discusiones posteriores, que se considera necesario para pensar en enfoques transdisciplinarios que ayuden a atender los efectos de la agroindustria en las comunidades rurales. Las diferentes fuentes revisadas dan cuenta de que el tema ha sido investigado



en distintos contextos y genera interés de personas y científicos comprometidos alrededor del mundo y particularmente en Latinoamérica.

Las luchas latinoamericanas contra los distintos tipos de extractivismos, incluido el agrario, han buscado interlocución con universidades y científicos para argumentar que las afectaciones sociales, ambientales, económicas y de salud son importantes al considerar los distintos modelos de desarrollo que se imponen en los distintos territorios, sobre todo al cuestionar sus efectos en la población.

En este sentido, la noción de justicia ambiental, aunada a la noción de afectados ambientales, son ejemplo de diálogos entre academia y luchas socioambientales (Berger y Carrizo, 2019). Para poder pensar en la posibilidad de justicia ambiental, con las limitaciones actuales del Estado de Derecho, es necesario definir también quién o quiénes son los afectados. En el caso de los territorios rurales, campesinos e indígenas, a pesar de que los agravios son históricos, resulta difícil acceder a procesos de reparación de daño y de justicia, pues se entrampan en discusiones confusas, mientras los daños siguen ocurriendo de manera sistemática y la carga de la comprobación del daño queda a responsabilidad de las personas ya vulneradas.

Tal es el caso de las afectaciones a niñeces y juventudes rurales, así como las generaciones futuras (Sánchez, 2023), que requieren el reconocimiento como sujetos de derecho (Santacoloma, 2014), así como una visión de justicia ambiental con perspectiva intergeneracional (Munévar, 2016) por las afectaciones actuales, pero también por las futuras que se acumulan desde el presente, muchas de ellas irreversibles (Morel, 2000). Particularmente las afectaciones por la exposición gradual y sistemática a pesticidas, como ya se mencionó anteriormente, aunque eso no demerita la atención necesaria para otros tipos de afectaciones, como por ejemplo: la de la alimentación cada vez más industrial y con productos obesogénicos, la de las radiaciones de telecomunicaciones, la del diseño de contenidos de redes sociales cada vez más adictivos, las drogas mismas, la contaminación química por otras actividades industriales y el deterioro medioambiental generalizado.

Ante todo lo anterior, se necesita entender la noción de afectado y de afectación (Berger, 2016), entendida como el resultado concreto de la vulneración de derechos a la salud y el ambiente, en este caso al estar expuestos al daño y al riesgo sus cuerpos y formas de vida, expresado en los cuerpos y formas de comportamiento asociados. Además de ello, los afectados padecen continuas formas de violencia institucional; a través de mecanismos que ahondan la privación de reconocimiento como afectados, así como de la injusticia ambiental, o directamente su represión al protestar por sus derechos en el espacio público; situaciones todas que dificultan a las víctimas de estos procesos reconocerse como afectados.

Otro elemento importante, pensando en el orden social adultocéntrico y estadocéntrico, es la carga de la prueba; es decir, que el afectado además de llevar el



proceso mismo de reconocimiento de las afectaciones, tiene además que llevar el proceso de comprobarlas y vivirlas. Esto en relación a temas como el abordado acá, toda la acumulación de efectos termina cayendo sobre los afectados mismos, en lugar de apelar a la prevención y al principio precautorio (Catota, 2020). Aunque ya se comienza a tomar en cuenta algunos elementos del Acuerdo de Escazu para la justicia ambiental (Valencia, 2020).

En relación a la construcción de lo “neuropsicosocial” como palabra y concepto, se parte de la consideración ya aceptada en distintas instituciones internacionales de salud de que el ser humano es Bio-Psico-Social. Sin embargo, aunque se reconozca la simultaneidad de esas dimensiones en la teoría, en la práctica y en la formación académica lo Bio, asociado a lo neuro, lo psicológico y lo social, siguen siendo abordados fragmentariamente.

Desde un enfoque transdisciplinario, lo biológico tendría que considerarse al menos en una dimensión ambiental y en una corporal, o más particularmente neurológica. La interacción entre los cuerpos y su ambiente ha implicado reconocer el concepto de Corporeización, desde la teoría ecosocial de la epidemiología de Nanci Krieger (2002), que permite pensar las formas como se presenta esto en entornos agroindustriales (Cárcamo, 2013). La corporeización es el proceso de incorporación, en un cuerpo biológico, de los elementos ambientales y sociales en los que ese cuerpo vive. A través de procesos ontogenéticos, filogenéticos y epigenéticos, hacen que el cuerpo, mediante la formación y procesamiento del sistema nervioso, se relacionen con el medio ambiente. Por lo tanto, si ese ambiente está atravesado por lógicas agroindustriales, ello tendrá efectos y afectaciones concretas, las reconoce la ciencia hegemónica o no.

El ambiente, si bien tiene su funcionamiento ecológico en tanto que sistema vivo, no se puede comprender sin lo social, por lo que el proceso que intersecta lo ambiental con lo social será el de territorialización, entendida como todo el proceso por el cual las sociedades asignan significados al medio ambiente, ordenando el mundo y las actividades a realizar en este. Una forma básica en que el mundo moderno organizó al mundo ha sido la dicotomía Urbano-Rural (Echeverría, 2013); asignando sobre todo a lo rural la subordinación. Uno de los mejores ejemplos de subordinación es la idea de que en lo rural se producirá el alimento para las grandes ciudades que cada vez crecen más; argumento que usa la agroindustria para justificar su crecimiento y sus dinámicas extractivas (ETC, 2017).

Las sociedades rurales, intervenidas por la agroindustria, no sólo implican una cuestión de técnica de desarrollo agrícola, sino también implican tácticas de subjetivación puestas al servicio de sostener esas formas de producir (Giraldo, 2018). En el caso concreto analizado, las formas de socialización están profundamente marcadas por las formas de producción agrícola. El monocultivo de maíz cambió



drásticamente la forma como se relacionaban las familias campesinas, y está directamente relacionada con el aumento de la escolarización, que fue siendo cada vez más la “mejor opción” para niñeces y juventudes rurales, a pesar de las desventajas acumuladas (Saravi, 2020) por las brechas territoriales (RIMISP, 2020).

La escolarización, relacionada con la educación, sigue siendo deseable socialmente y un mecanismo de subjetivación aún efectivo para niñeces y juventudes, que es normativo respecto a qué se espera en su desarrollo. A pesar de los grandes cambios sociales, la escuela sigue teniendo la misma estructura desde hace más de 100 años, mientras que la agroindustria giró drásticamente en las últimas dos décadas. En muchos espacios rurales agroindustriales las escuelas, con sus viejas formas, son fumigadas con sus estudiantes dentro (Kretschmer, R., Areco, A., & Palau, M. 2020). Aun así, se espera que las niñas y niños sigan poniendo atención a escuelas cada vez más desvinculadas de las realidades de sus territorios, desconociendo que la atención, al igual que otros procesos psicológicos básicos para el aprendizaje escolar, están profundamente relacionados con un neurodesarrollo típico, mientras que las niñas y niños son expuestos a sustancias neurotóxicas desde antes de nacer por las exigencias agroindustriales en las que sus familias viven.

También está documentada una correlación entre la presencia de estos agroquímicos con trastornos como el “Negativista desafiante” y el TDAH (Hidalgo, Benavidez & Hernández, 2022), lo cual atenta contra dos pilares básicos sobre los que se había sostenido la escuela tradicional y que marcarían el que un niño sea buen estudiante: la atención y la obediencia. Con todo lo anterior en conjunto es que se plantea la necesidad de un nuevo concepto que surge del diálogo transdisciplinar, el cual se representa en la Figura 1.

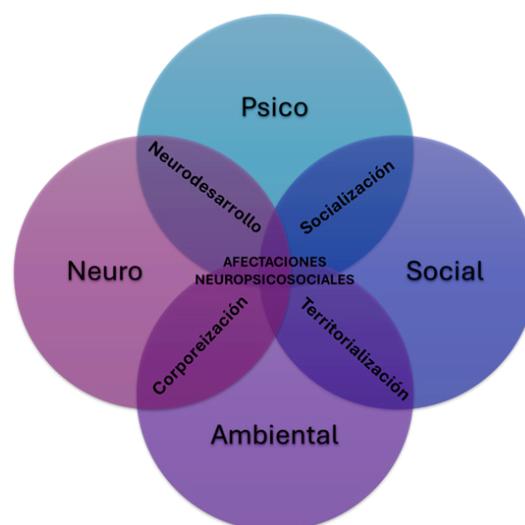


Figura 1. Representación de las afectaciones neuropsicosociales
Fuente: Elaboración propia



La Figura 1 trata de representar las primeras coordenadas para el análisis de las afectaciones neuropsicosociales, es un concepto todavía en construcción, pero apunta a las principales dimensiones que se pueden reconocer en este tema derivadas de la revisión bibliográfica. El trabajo tiene que seguir nutriéndose de lo empírico para lograr un enfoque integral que haga dialogar a la neuropsicología de una manera más social y crítica (Grande, 2009, Garay, 2017). La psicología social debe estar situada en las particularidades de los territorios rurales atravesados por lógicas agroindustriales para buscar una atención integral a niñeces y juventudes afectadas por la agroindustria. Apelando a la plasticidad cerebral y a una psicología socialmente comprometida y culturalmente situada, buscar alternativas para intervenir en las dificultades que se les presentan en sus trayectorias escolares y de vida

Conclusiones

El neurodesarrollo, como proceso integrador de las estructuras cognitivas y del sistema nervioso central, se ve amenazado por la exposición de los cuerpos infantiles a fumigaciones agroindustriales. Ya está documentado, en otras comunidades similares, que las niñas y niños tienen marcajes de pesticida en su orina y sangre, por lo que se puede inferir que en otros lugares donde hay agroindustria también sucede. También está documentada la correlación entre la presencia de estos agroquímicos con trastornos como el “Negativista desafiante” y el TDAH, los cuales se comienzan a percibir en aumento por distintos actores relacionados con niñeces y juventudes; sin embargo, no es suficiente una descripción etiológica basada en criterios clínicos que desconozcan el ambiente y la sociedad en la que se dan.

Cada vez es más evidente la necesidad de abordar los problemas complejos desde múltiples enfoques y con una variedad de perspectivas. Sin embargo, a pesar de la creciente comprensión sobre la importancia de estos análisis integrales, persiste una falta de voluntad para actuar en torno a problemáticas que requieren un cuestionamiento profundo de las normas establecidas, especialmente en áreas relacionadas con la agroindustria y sus impactos. Esto es especialmente preocupante cuando se consideran las evidencias que demuestran cómo las comunidades están siendo afectadas por el uso indiscriminado de agroquímicos. Estos efectos no son meramente accidentales, sino que reflejan una consecuencia social derivada de la presión económica por maximizar la producción, incluso cuando ya existe un exceso de oferta en algunos mercados. Esta dinámica nos obliga a replantear el equilibrio entre la necesidad de producción masiva y el bienestar social, reconociendo que las soluciones deben ir más allá de lo económico para incluir una evaluación ética y social profunda.



Conflicto de intereses

“Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.”

Referencias

- A. Pérez-Carrera, A., Moscuza, C., & Fernández-Cirelli, A. (2008). Efectos socioeconómicos y ambientales de la expansión agropecuaria. Estudio de caso: Santiago del Estero, Argentina. *Ecosistemas*, 17(1), 5-15. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/108>
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture, Second Edition*. CRC Press <https://doi.org/10.1201/9780429495465>
- Bah, H. A. F., Santos, N. R. D., Costa, D. O., Carvalho, C. F. D., Martinez, V. O., Gomes-Júnior, E. A., & Antônio Menezes-Filho, J. (2023). Toxicidad en el neurodesarrollo ambiental desde la perspectiva del modelo bioecológico de Bronfenbrenner: un estudio de caso de metales tóxicos. *Cadernos de Saúde Pública*, 39(9), e00202022. <https://doi.org/10.1590/0102-311XEN202022>
- Batista, F. (2001). Aproximación metodológica desde la psicología social a la investigación en zonas rurales. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, (191), 225-233.
- Berger, M. (2016). Afectados ambientales. Hacia una conceptualización en el contexto de luchas por el reconocimiento. *Debates en Sociología*, (42), 31-53. <https://doi.org/10.18800/debatesensociologia.201601.002>
- Berger, M. & Carrizo, C. (2019). *Afectados Ambientales: aportes conceptuales y prácticos para la lucha por el reconocimiento y garantía de derechos*. Ediciones Ciencia y Democracia. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/11482>
- Bjørling-Poulsen, M., Andersen, H.R. & Grandjean, P. (2008) Potential developmental neurotoxicity of pesticides used in Europe. *Environ Health*, 7, 50. doi.org/10.1186/1476-069X-7-50
- Breilh, J. (2013). La determinación social de la salud como herramienta de transformación hacia una nueva salud pública (salud colectiva). *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 31(Suppl. 1), S13-S27. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2013000400002&lng=en&tlng=es.
- Caletti, M. (coord.). (2021). *Efecto de los Agrotóxicos en la Salud Infantil*. Sociedad Argentina de Pediatría. https://www.sap.org.ar/uploads/archivos/general/files_efectos-agrotoxicos-07-21_1625686827.pdf
- Catota, M. C. (2020). *La inversión de la carga de la prueba en los delitos ambientales* [tesis de maestría, Universidad Andina Simón Bolívar]. Repositorio institucional UASB. <http://hdl.handle.net/10644/7723>



- Cárcamo, M. (2013). *Significaciones sociales en torno a la contaminación ambiental y su vinculación con afecciones de salud en contexto agroindustrial: el caso de San Pedro de Quillota* [tesis de pregrado, Universidad de Valparaíso]. Repositorio institucional UV. <http://repositoriobibliotecas.uv.cl/handle/uvscl/7001>
- Claudine Uwamahoro, C., Jo, J-H., Jang, S-I., Jung, E-J., Lee, W-J., Bae, J-W & Kwon, W-S. (2024). Assessing the Risks of Pesticide Exposure: Implications for Endocrine Disruption and Male Fertility. *International Journal of Molecular Science*, 25(13), 6945. <https://doi.org/10.3390/ijms25136945>
- Domínguez, D. & Sabatino, P. (2005). *La muerte que viene en el viento. Los problemática de la contaminación por efecto de la agricultura transgénica en Argentina y Paraguay*. CLACSO. <http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/ar/libros/becas/2005/soja/domsa.pdf>
- European Commission. (s. f.). *Farm to Fork Strategy: For a fair, healthy and environmentally-friendly food system*. Recuperado el 2 de octubre de 2024 en https://ec.europa.eu/food/farm2fork_en
- ETC Grupo. (2017). *¿Quién nos alimentará? La red campesina alimentaria o la cadena agroindustrial*. 3ª Edición. https://www.etcgroup.org/es/quien_alimentara
- González-Pérez, L. I., Ramírez Montoya, M. S., & García-Peñalvo, F. J. (2022). Habilidadores tecnológicos 4.0 para impulsar la educación abierta: aportaciones para las recomendaciones de la UNESCO. *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 25(2), 23–48. <https://doi.org/10.5944/ried.25.2.33088>
- Grande-García, I. (2009). NEUROCIENCIA SOCIAL: EL MARIDAJE ENTRE LA PSICOLOGÍA SOCIAL Y LAS NEUROCIENCIAS COGNITIVAS. REVISIÓN E INTRODUCCIÓN A UN NUEVA DISCIPLINA. *Anales de Psicología / Annals of Psychology*, 25(1), 1–20. <https://revistas.um.es/analesps/article/view/71441>
- Grandjean, P., & Landrigan, P. J. (2006). Developmental neurotoxicity of industrial chemicals. *The Lancet*, 368(9553), 2167-2178. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(06\)69665-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)69665-7)
- Gunnar, M. R., & Quevedo, K. (2007). The neurobiology of stress and development. *Annual Review of Psychology*, 58(1), 145-173. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.58.110405.085605>
- Hidalgo, M. (2022). *Asociación entre exposición a plaguicidas con trastorno por déficit de atención y negativo desafiante en infantes de área rural de Bogotá, Colombia* [tesis de maestría, Universidad del Rosario]. Repositorio institucional UR. <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/34778>
- Kaczewer, J. (2006). *Uso de agroquímicos en las fumigaciones periurbanas y su efecto nocivo sobre la salud humana*. Instituto Argentino de Terapia Neural. <https://terapia-neural.ar/uso-de-agro-quimicos/>



- Kretschmer, R., Areco, A., & Palau, M. (2020). *Escuelas rurales fumigadas en Paraguay. Estudio de tres casos en tres distritos*. BASE-IS.
- Krieger, N. (2001). Teorías para la epidemiología social en el siglo XXI: una perspectiva ecosocial. *International Journal of Epidemiology*, 30(4), 668-77. <http://dsp.facmed.unam.mx/wp-content/uploads/2015/11/krieger2.pdf>
- Krieger, N. (2002). Glosario de epidemiología social. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 11(5-6), 480-490. <https://www.scielosp.org/pdf/rpsp/v11n5-6/10738.pdf>
- Landini, F (coord.). (2015). *Hacia una psicología rural latinoamericana*. Clacso. https://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/se/20150213020711/Hacia_una_psicologia_rural.pdf
- Lanphear, B. P., Hornung, R., Khoury, J., Yolton, K., Baghurst, P., Bellinger, D. C., Canfield, R. L., Dietrich, K. N., Bornschein, R., Greene, T., Rothenberg, S. J., Needleman, H. L., Schnaas, L., Wasserman, G., Graziano, J. & Roberts, R. (2005). Low-level environmental lead exposure and children's intellectual function: An international pooled analysis. *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 894-899. <https://doi.org/10.1289/ehp.7688>
- Levitt, P. (2003). Structural and functional maturation of the developing primate brain. *The Journal of Pediatrics*, 143(4), S35-S45. [https://doi.org/10.1067/S0022-3476\(03\)00400-1](https://doi.org/10.1067/S0022-3476(03)00400-1)
- McKay, B. M., Alonso, A., & Ezquerro, A. (2022). *Extractivismo agrario en América Latina*. CLACSO. <https://www.clacso.org/wp-content/uploads/2022/08/Extractivismo-agrario.pdf>
- McMichael, P. (2009). A food regime genealogy. *The Journal of Peasant Studies*, 36(1), 139-169. <https://doi.org/10.1080/03066150902820354>
- Morel, J. T. (2000). EQUIDAD INTERGENERACIONAL CON COSTOS AMBIENTALES INCIERTOS E IRREVERSIBLES. *El Trimestre Económico*, 67(265(1)), 3-25. <http://www.jstor.org/stable/20857012>
- Munévar, C. (2016). Los sujetos de las futuras generaciones: ¿quiénes son los titulares de derechos intergeneracionales ambientales? *Opción: Revista de Ciencias Humanas y Sociales*, (79), 184-196. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5922892>
- Nogar, A. G., & Larsen, B. A. (2014). Análisis de riesgos en la salud de la población rural de la pampa argentina por uso de agroquímicos en cultivo de soja. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(2), 71-84. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5590914>
- Otero, G. (2013). El régimen alimentario neoliberal y su crisis: Estado, agroempresas multinacionales y biotecnología. *Antípoda. Revista de Antropología y Arqueología*, (17), 49-78. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-54072013000200004&lng=en&tlng=es.



- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447-465. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163>
- Qasim, S., Khan, Y.H., Mallhi, T.H. (2021). Pesticides and Neurological Disorders: From Exposure to Preventive Interventions. En M.S.H. Akash, & K. Rehman (eds), *Environmental Contaminants and Neurological Disorders. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies* (89-109). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66376-6_5
- Rimisp - Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural. (2020). *Informe Latinoamericano Pobreza y Desigualdad 2019. Juventud rural y territorio*. <https://rimisp.org/sintesis-informe-2019/>
- Rozas, M.E. (2021). *Revisión de estudios epidemiológicos sobre efectos de los plaguicidas en niñas, niños e infantes de América Latina. Retos para la salud pública*. Red de acción de plaguicidas y sus alternativas en América Latina (RAP AL). Recuperado de https://reduas.com.ar/wp-content/uploads/2021/12/Revision-de-Estudios-epidemiologicos_ni%C3%B1os_plaguicidas_Maria-Elena-Rozas-071221.doc-1-1.pdf
- Sánchez, D., (2020). *Palos Altos entre la muchachada y la juventud: la condición juvenil rural en una comunidad ranchera de Jalisco* [tesis doctoral, Universidad Autónoma de México, Unidad Xochimilco]. Repositorio institucional UAM. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/1313>
- Sánchez, D. (2023). Las juventudes rurales ante el “Gigante Agroalimentario” en Jalisco, México. Reflexiones sobre afectación ambiental y justicia intergeneracional. *Utopía y Praxis Latinoamericana*, 28(102), e8027788. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/utopia/article/view/e8027788>
- Santacoloma, L. J. (2014). *Las generaciones futuras como sujetos de derecho* [tesis de maestría, Universidad de Palermo]. Repositorio institucional UP. <https://dspace.palermo.edu/dspace/bitstream/handle/10226/1264/TESIS%20LAS%20GENERACIONES%20FUTURAS%20COMO%20SUJETOS%20DE%20DERECHO%281%29.pdf>
- Saraví, G. (2020). Acumulación de desventajas en América Latina: aportes y desafíos para el estudio de la desigualdad. *Revista Latinoamericana de Población*, 14(27), 228-256. <https://doi.org/10.31406/relap2020.v14.i12.n27.7>
- Secretaría de Desarrollo Rural. (2014). *Jalisco: Gigante Agroalimentario. Gobierno del Estado de Jalisco*. https://sader.jalisco.gob.mx/sites/sader.jalisco.gob.mx/files/jaliscogiganteagroalimentario_v1.pdf
- Shonkoff, J. P., & Phillips, D. A. (eds.). (2000). *From neurons to neighborhoods: The science of early childhood development*. National Academy Press.



- Sierra-Díaz, E., Celis-de la Rosa, A. D. J., Lozano-Kasten, F., Trasande, L., Peregrina-Lucano, A. A., Sandoval-Pinto, E., & González-Chávez, H. (2019). Urinary pesticide levels in children and adolescents residing in two agricultural communities in Mexico. *International journal of environmental research and public health*, 16(4), 562. <https://doi.org/10.3390/ijerph16040562>
- Sosinski, E. E., Franco, J., & Rossing, W. A. H. (2020). Efecto de la intensificación de la producción de leche en el Noroeste de Uruguay en los servicios ecosistémicos. *Agrociencia Uruguay*, 24(spe), e352. <https://doi.org/10.31285/agro.24.nspe.352>
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518-522. <https://doi.org/10.1038/nature13959>
- Valencia, J. G. (2020). El Acuerdo de Escazú y el derecho de acceso a la justicia ambiental como elementos centrales en la construcción de una ciudadanía ambiental global. En I. Vargas-Chaves, A. Gómez-Rey, & A. Ibáñez-Elam (eds.), *Escuela de derecho ambiental: Homenaje a Gloria Amparo Rodríguez* (39-76). Editorial Universidad del Rosario. <https://doi.org/10.2307/j.ctv10crck3.6>
- Yañez, A.I. (2020). *Vulnerabilidad social y funcionamiento cognitivo de niños residentes en contextos de amenaza ambiental en Hermosillo* [tesis de doctora, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C]. Repositorio institucional CIAD. <https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1006/1121/1/Adrian%20Israel%20Ya%C3%B1ez%20Quijada.pdf>
- Zenteno, Z. (2019). *Una sentencia que protege al ambiente, la salud, la infancia y a los trabajadores*. Universidad siglo 21. <https://repositorio.21.edu.ar/handle/ues21/21808>

Análisis del perfil proximal y proteico de una especie de frijol subutilizada de México: *Phaseolus coccineus* L.

Eduardo Pizano-Galvez¹, Montserrat Alcázar-Valle¹, Jorge Luis Coronado-Cáceres¹, Luis Mojica¹ y Eugenia Lugo-Cervantes^{1*}

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), Unidad de Tecnología Alimentaria, Zapopan, México.

*Autor de correspondencia: elugo@ciatej.mx

Palabras clave:

Ayocote, fraccionamiento, macronutrientes, proteínas, SDS-PAGE.

Resumen

Phaseolus coccineus L. (ayocote) es una especie de frijol originaria de México con alto potencial nutricional. El objetivo del presente trabajo fue la evaluación del perfil proximal y proteico de una variedad de frijol ayocote del estado de Puebla. Se llevó a cabo el análisis proximal del frijol, así como la determinación de su perfil proteico de acuerdo con su solubilidad. El análisis proximal mostró que la variedad de frijol es una buena fuente de proteína (20.30%) con un perfil proteico balanceado entre las fracciones albúmina (38.58%), globulina (22.29%) y glutelina (38.63%). De acuerdo a los resultados del estudio se concluye que el frijol ayocote tiene potencial para ser una fuente nutricional comparable a otras especies de frijol y otras legumbres como la soya, el garbanzo o el chícharo con mayor índice de investigación y consumo, lo que alienta a robustecer la información disponible sobre la calidad proteica y nutricional de esta especie de frijol.

Introducción

Las legumbres son un grupo de alimentos que desempeñan un papel clave en la alimentación humana y representan una importante fuente de proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales. Su consumo a nivel mundial está relacionado al mejoramiento nutricional, particularmente en regiones donde la proteína animal no es de fácil acceso (Hughes et al., 2022). En México, las legumbres, especialmente el frijol, son parte fundamental de la alimentación básica desde tiempos precolombinos (Contreras et al., 2023). Dentro de las aproximadamente 65 especies de frijol existentes en México, se encuentra *Phaseolus coccineus* L, comúnmente conocida como frijol ayocote (Alcázar-Valle et al., 2021).

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 179-189.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14712595>

Recibido: 04 de octubre 2024
Revisado: 26 de noviembre 2024
Aceptado: 23 de diciembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



El frijol ayocote, también conocido como patol, es una especie cuyo centro de origen y domesticación rastreado mediante evidencias lingüísticas, geográficas y arqueológicas desde una planta silvestre en las montañas mexicanas, específicamente en las regiones altas de Puebla, Oaxaca y Chiapas (Delgado Salinas, 1988; Vargas-Vázquez et al., 2011). Actualmente se reconocen dos subespecies dentro de esta especie, los ayocotes (*P. coccineus* subsp. *coccineus*); los cuales, a su vez, se subdividen en dos formas: los mexicanos o ayocotes y los guatemaltecos o botiles; y los piloy (*P. coccineus* subsp. *darwinianus*), ambas caracterizadas por su adaptabilidad a los factores climáticos y condiciones adversas (Ruíz-Salazar et al., 2021). Sin embargo, es considerada una especie de frijol subutilizada ya que su consumo es reducido y se limita solo a las regiones donde es cultivado (Alvarado-López et al., 2019).

El estudio de las legumbres ha demostrado que su ingesta regular es un factor para el mejoramiento de la salud, atribuido a su alto contenido proteico y alto valor nutritivo en general (Polak et al., 2015). No obstante, los estudios relacionados al frijol ayocote aún son escasos, particularmente respecto a su perfil proteico. El frijol ayocote cuenta con el potencial para ser una fuente importante de proteínas y nutrientes. Además, el fraccionamiento de sus proteínas puede aportar a la comprensión de sus aspectos funcionales y nutricionales (Carbonaro et al., 2015).

El fraccionamiento de proteínas es crucial para evaluar la calidad nutricional, biofuncional y tecnofuncional de la proteína de los alimentos y con ello evaluar sus aplicaciones en la elaboración de productos alimentarios (Padilla et al., 2010). Por lo tanto, el presente artículo tuvo como objetivo analizar la composición bromatológica, así como fraccionar la proteína soluble de una variedad de frijol ayocote proveniente del estado de Puebla para permitir un mejor conocimiento de su composición proximal, proporcionando bases para la promoción del estudio de sus características nutricionales, biofuncionales y tecnofuncionales.

Materiales y Métodos

Materia prima

El frijol ayocote fue recolectado en el municipio de San Juan Pancoac, Huejotzingo, Puebla durante la cosecha del segundo semestre del año 2023. Posteriormente el frijol se descascarilló y el cotiledón se pulverizó y tamizó en malla 60. La harina obtenida fue almacenada a 4 °C hasta el momento de su análisis.

Análisis de la composición proximal

El análisis proximal de las semillas fue realizado conforme a los métodos internacionales oficiales de análisis AOAC y establecido en las normas mexicanas: proteína



(NMX-F-608-NORMEX-2021), humedad (NMX-F-083-1986), cenizas (NMX-F-607-NORMEX-2020), grasas (NOM-086-SSA1-1994), fibra cruda (NMX-F-613-NORMEX-2017) y carbohidratos totales por diferencia.

Fraccionamiento de proteínas

El fraccionamiento de la proteína soluble del frijol se llevó a cabo mediante el método de solubilidad de Osborne y Mendel aplicado por Yang et al. (2024) con algunas modificaciones. Brevemente, los búferes se agregaron en proporción 1:10 (p/v) secuencialmente para extraer cada fracción. En orden, agua (albúminas), NaCl 1 M (globulinas), etanol al 70% (prolaminas) y NaOH 0.05 M (glutelinas). La muestra fue sometida a agitación magnética a 25 °C durante 1 h. Posteriormente, se centrifugó a 4 °C durante 40 minutos a 3430 g y el sobrenadante fue recolectado y almacenado en congelación. Se inició con una muestra de harina y posteriormente se resuspendió el precipitado en el búfer siguiente.

Electroforesis en gel de poliacrilamida bajo condiciones desnaturalizantes (SDS-page)

La electroforesis en gel de poliacrilamida de las fracciones proteicas del frijol se llevó a cabo de acuerdo al método reportado por Laemmli (1970) en el sistema Mini-PROTEAN (Bio-Rad, Hercules, CA, USA) usando un gel al 12% de acrilamida/bis. Se aplicó el equivalente a 15 µg de muestra en condiciones reductoras (β -mercaptoetanol al 5%) y no reductoras (ausencia de β -mercaptoetanol) por pocillo. Las muestras migraron en condiciones de 60 V durante 30 min para la región concentradora y 80 V hasta el final de la migración. Se usó SimplyBlueMT SafeStain (Cat. No. LC6060, ThermoFisher, Waltham, MA, USA) para visualizar las bandas. El peso molecular de las proteínas fue determinado por el estándar de peso molecular Precision Plus Protein Dual Color Standards (10 a 250 kDa) (#1610374, Bio-Rad, Hercules, CA, USA). Las imágenes fueron capturadas con el equipo UVP ChemStudio Imaging System (ChemStudio, Analytik Jena, Jena, Turingia, DEU).

Análisis estadístico

Los datos fueron procesados mediante análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey ($P < 0.05$) con el uso del software STATGRAPHICS Centurion 10 versión 18.1.16 (Statgraphics Technologies Inc., The Plains, VA, USA). Los resultados fueron reportados como valores promedio \pm desviación estándar con el uso de triplicados independientes. Las figuras fueron hechas con el uso del software GraphPad Prism versión 9.4.1 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA).



Resultados y Discusión

Composición proximal

Los carbohidratos representaron el macronutriente predominante en el frijol (64.64±0.00% en peso) (Figura 1). Seguido por el contenido de proteína que representó el 20.30±0.06% del peso total del frijol. Además, destacó el bajo contenido de grasa (0.84±0.01% en peso).

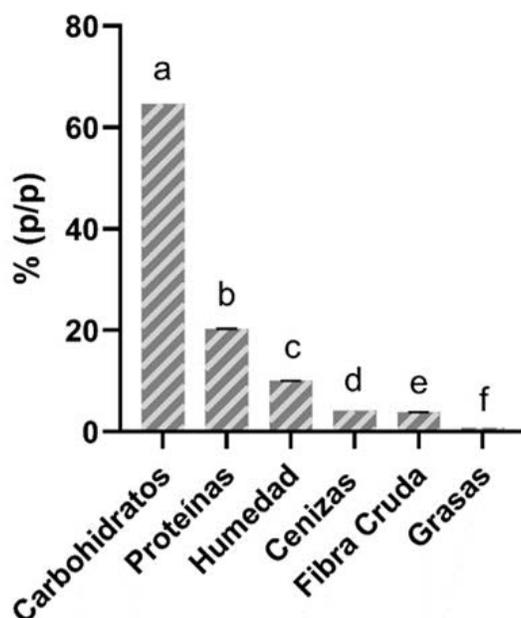


Figura 1. Composición proximal de frijol ayocote proveniente de Puebla. Resultados presentados como medias ± desviación estándar de porcentaje en peso

Fuente: elaboración propia

El contenido proteico es el atributo de mayor interés en las legumbres debido a las implicaciones tecnofuncionales que tienen en el desarrollo de nuevos productos, así como su importancia nutricional (Huamaní-Perales et al., 2024; Prandi et al., 2021). De acuerdo a la literatura, el contenido proteico del frijol ayocote oscila entre el 16% y 26% en peso (p/p) (Redondo-Cuenca et al., 2022). El resultado del presente estudio fue mayor al reportado por Alcázar-Valle et al. (2021), quienes reportaron una concentración promedio de proteína del 17.28±2.06% (p/p) en muestras de frijol ayocote recolectadas de la región pacífico sur de México y las reportadas por Alvarado-López et al. (2019), quienes reportaron la concentración de proteína en cuatro variedades de frijol ayocote: negro (18.93±0.54% p/p), morado (18.53±1.17% p/p), café (18.07±0.91% p/p) y blanco (18.25±0.76% p/p). Sin embargo, Redondo-Cuenca et al. (2022) reportaron una concentración de proteína superior en la variedad judión (22.66±0.41% p/p).



En cuanto al resto de grupos de macro nutrientes, Osuna-Gallardo et al. (2023) reportaron valores superiores de carbohidratos ($73.93 \pm 0.72\%$ p/p), grasas ($2.78 \pm 0.31\%$ p/p) y cenizas ($4.450.07\%$ p/p). En contraste con algunos de los resultados reportados por Vázquez Mendoza (2021), quien reportó valores inferiores a los de este estudio en el contenido de carbohidratos ($58.70 \pm 0.26\%$ p/p) y cenizas ($3.59 \pm 0.05\%$ p/p), sin embargo, un mayor contenido de grasas ($3.66 \pm 0.14\%$ p/p) y fibra cruda ($4.94 \pm 0.59\%$ p/p). En general, los datos resultantes de este estudio y los reportados por otros autores son muy variables a pesar de ser muestras de la misma especie. Estas variaciones pueden ser atribuidas a factores como las prácticas de cultivo, condiciones ambientales, localización geográfica, uso de fertilizantes e incluso variaciones genéticas pueden afectar las características nutricionales entre las variedades de frijol ayocote (Bernardino-Nicanor et al., 2017; Ruíz-Salazar et al., 2021).

Fracciones proteicas

En el fraccionamiento de proteína soluble, la albúmina y glutelina ($38.58 \pm 2.89\%$ y $38.63 \pm 1.45\%$, respectivamente) representaron los grupos mayoritarios, seguido por la globulina ($22.29 \pm 5.26\%$) y la presencia de trazas de prolamina ($0.50 \pm 0.19\%$) (Tabla 1). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Raya-Pérez et al. (2014), quienes reportaron la predominancia de albúminas en la variedad de frijol común denominada bayo berrendo (53.49%), mientras que en la variedad denominada patzcuareño reportaron la predominancia de globulinas (55.74%). En el mismo sentido, Yang et al. (2024) también reportaron la predominancia de albúminas (56%). Sánchez-Arteaga et al. (2015) presentaron un extenso reporte de las fracciones proteicas de distintas variedades de frijol común, en donde destacan las fracciones albúmina (32.90 – 43.80%) y glutelina (24.70 – 43.30%) como las predominantes entre las variedades. No obstante, todos los trabajos convergieron en la casi nula presencia de prolaminas. Los datos sustentan la clasificación del frijol como una semilla libre de gluten puesto que, en este tipo de proteínas, las prolaminas y glutelinas son esenciales en su estructura y la ausencia de una de ellas evita la formación de gluten (Tuna et al., 2024). El contraste de los resultados entre los estudios presentados es explicado, al igual que las variaciones en el perfil proximal, por factores ambientales, condiciones de cultivo o variaciones genéticas y en este caso también la diferencia entre especies (Perazzini et al., 2008) ya que no fue posible establecer un punto de comparación más estrecho por la falta de información acerca de las fracciones proteicas del frijol ayocote.

El estudio de los grupos de proteínas, albúminas, globulinas, prolaminas y glutelinas, es un conocimiento necesario y de gran importancia para determinar y optimizar sus usos tecnofuncionales en el diseño de nuevos productos alimenticios. Puesto que son responsables de características como la capacidad emulsionante,



espumante, gelificante y de retención de agua en la composición de alimentos funcionales y estructurados, como sustitutos de carne, bebidas proteicas y productos de panificación. Su amplio rango de solubilidad y estabilidad permite la creación de diferentes aplicaciones para mejorar la textura, la estabilidad y la nutrición de muchos productos a los que sirve; por lo tanto, el estudio de su composición y proporciones amplía el rango donde se puede aplicar la innovación en el sector alimentario (Huamaní-Perales et al., 2024).

Tabla 1. Comparación de las fracciones de proteína soluble de una variedad de frijol ayocote endémica de México y variedades de frijol común

Fracción	Ayocote Puebla		(Raya-Pérez et al., 2014)	(Sánchez-Arteaga et al., 2015)	(Yang et al., 2024)
	mg/g	%	%	%	%
Albúmina	31.65±2.37a	38.58	30.90 – 53.49	32.80 – 43.80	56.20
Globulinas	18.29±4.32b	22.29	19.80 – 55.74	23.10 – 41.50	21.90
Prolaminas	0.41±0.16c	0.50	5.88 – 6.19	0.60 – 1.40	0.65
Glutelinas	31.69±1.19a	38.63	7.08 – 20.80	24.70 – 43.30	15.70

Nota. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. Letras distintas expresan diferencias estadísticas entre filas de acuerdo a la prueba de Tukey ($P < 0.05$). la columna mg/g representa la concentración de proteína respecto al peso de la harina. La columna % representa el porcentaje respecto al total de proteína soluble.

Perfil SDS-PAGE

El perfil SDS-PAGE (Figura 2) evidenció la presencia de bandas desde 15 a 100 kDa en condiciones reductoras y no reductoras. Se observaron bandas de 75, 55, 40, 20 y 15 kDa en el carril correspondiente a las albúminas (AlbPU) y bandas de 75, 55, 40, 30, 17 y 15 kDa en el carril correspondiente a las globulinas (GloPU), mientras que en el carril perteneciente a las glutelinas (GluPU) se identificaron bandas de 100, 40, 30 y 20 kDa mucho más tenues comparado al resto de fracciones. La concentración de la fracción prolamina fue insuficiente para cargar la muestra en el gel. Se observó la presencia de puentes disulfuro en los carriles de AlbPU y GloPU evidenciado por la aparición de bandas de 55 kDa en condiciones reductoras, mismas que estuvieron ausentes en condiciones no reductoras. En el mismo sentido, se identificó la presencia de las subunidades ácida (30 kDa) y básica (20 kDa) de las globulinas 11S (San Pablo-Osorio et al., 2019) en condiciones reductoras.

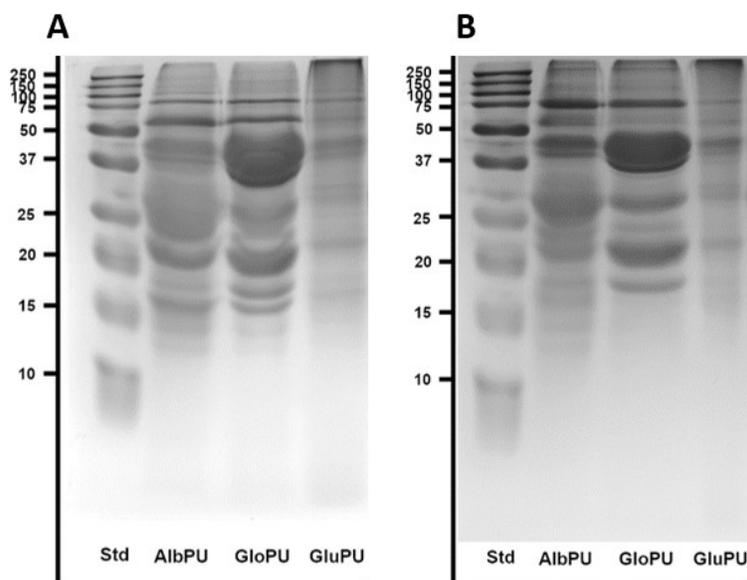


Figura 2. Perfil SDS-PAGE de las albúminas (AlbPU), globulinas (GloPU) y glutelinas (GluPU) de la proteína de frijol ayocote provenientes de Puebla en condiciones reductoras (A) y no reductoras (B). Std: Estándar de pesos moleculares (10-250 kDa)
Fuente: elaboración propia

Conclusiones

El presente trabajo evidenció que el frijol ayocote (*Phaseolus coccineus* L.) es una fuente potencial de proteínas ($20.3 \pm 0.06\%$), destacando la proteína soluble del tipo albúmina ($38.58 \pm 2.89\%$) y globulina ($22.29 \pm 5.26\%$). Además de ser un alimento considerado libre de gluten caracterizado por la ausencia de prolaminas ($0.50 \pm 0.19\%$), con un bajo contenido de grasas ($0.84 \pm 0.01\%$) y una buena fuente de carbohidratos ($64.64 \pm 0.00\%$). Estas características colocan al frijol ayocote como un alimento con perfil proximal comparable con otro tipo de legumbres como la soya, el garbanzo u otras especies de frijol. Los resultados de este estudio proporcionan una base para el estudio de las características nutricionales y tecnofuncionales que influyen directamente en el desarrollo de alimentos, así como la promoción del cultivo y consumo de esta especie subutilizada originaria de México.

Perspectivas

Este artículo propone diversas proyecciones para la investigación del frijol ayocote. Se plantea el estudio integral del perfil nutricional del frijol, comprendiendo la cuantificación de atributos importantes como el contenido de fibra dietaria, fibra soluble y fibra insoluble, la caracterización de carbohidratos, el perfil de minerales y vitaminas, así como el perfil aminoacídico de las proteínas y el estudio de su digestibilidad. Asimismo, el estudio de la sinergia entre los grupos de nutrientes y el impacto de estos en las características tecnofuncionales de la harina del frijol y su



impacto en su incorporación al desarrollo de productos. Así como el estudio de sus propiedades biofuncionales para la prevención de enfermedades no transmisibles.

Conflicto de intereses

Los autores declaran la no existencia de conflicto de intereses financieros o personales que pudieron haber influido en la realización de este estudio o en la interpretación de sus resultados, salvo el interés del desarrollo científico.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el otorgamiento de la beca de posgrado (CVU:1260931). Al Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ) por proveer los recursos necesarios para el trabajo. A la doctora Soledad García Morales por proporcionar las muestras de frijol ayocote con las que se llevó a cabo este estudio.

Financiamiento

El presente estudio fue financiado por CONAHCYT a través del fondo FORDECYT 292474-2017.

Referencias

- Alcázar-Valle, M., García-Morales, S., Mojica, L., Morales-Hernández, N., Sánchez-Osorio, E., Flores-López, L., Enríquez-Vara, J. N., & Lugo-Cervantes, E. (2021). Nutritional, antinutritional compounds and nutraceutical significance of native bean species (*Phaseolus* spp.) of mexican cultivars. *Agriculture (Switzerland)*, 11(11), 1031. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111031>
- Alvarado-López, A. N., Gómez-Oliván, L. M., Heredia, J. B., Baeza-Jiménez, R., García-Galindo, H. S., & Lopez-Martinez, L. X. (2019). Nutritional and bioactive characteristics of ayocote bean (*Phaseolus coccineus* L.): An underutilized legume harvested in Mexico. *CYTA - Journal of Food*, 17(1), 199–206. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1571530>
- Bernardino-Nicanor, A., Acosta-García, G., Güemes-Vera, N., Montañez-Soto, J. L., de los Ángeles Vivar-Vera, M., & González-Cruz, L. (2017). Fourier transform infrared and Raman spectroscopic study of the effect of the thermal treatment and extraction methods on the characteristics of ayocote bean starches. *Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 933–943. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2370-1>
- Carbonaro, M., Maselli, P., & Nucara, A. (2015). Structural aspects of legume proteins and nutraceutical properties. *Food Research International*, 76, 19–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.11.007>



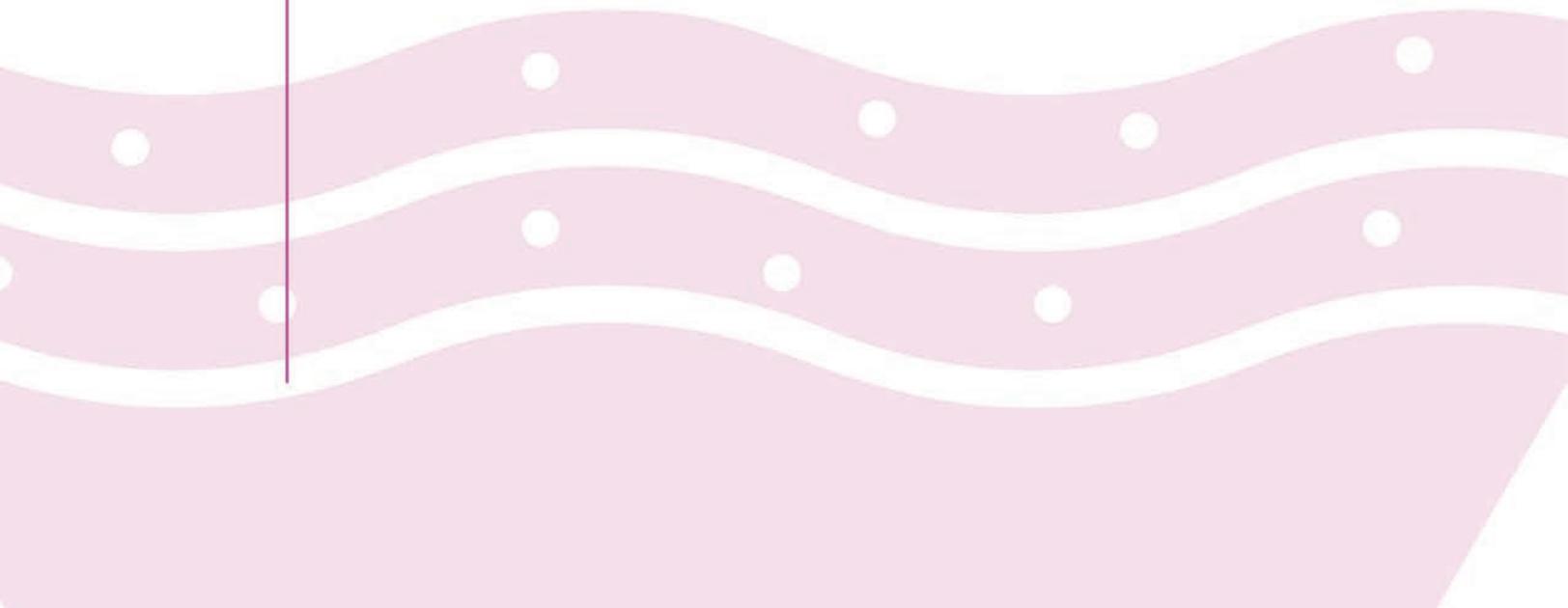
- Contreras, J., Alcázar-Valle, M., Lugo-Cervantes, E., Luna-Vital, D. A., & Mojica, L. (2023). Mexican native black bean anthocyanin-rich extracts modulate biological markers associated with inflammation. *Pharmaceuticals*, *16*(6), 874. <https://doi.org/10.3390/ph16060874>
- Delgado Salinas, A. (1988). Variation, taxonomy, domestication, and germplasm potentialities in *Phaseolus coccineus*. En P. Gepts (ed.), *Genetic Resources of Phaseolus Beans: Their maintenance, domestication, evolution and utilization* (pp. 441–463). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2786-5_18
- Huamaní-Perales, C., Vidaurre-Ruiz, J., Salas-Valerio, W., Cabezas, D. M., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2024). A review of techno-functional properties of legume proteins and their potential for development of new products. *European Food Research and Technology*, *250*, 2069–2092. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04536-6>
- Hughes, J., Pearson, E., & Grafenauer, S. (2022). Legumes—A comprehensive exploration of global food-based dietary guidelines and consumption. *Nutrients*, *14*(15), 3080. <https://doi.org/10.3390/nu14153080>
- Laemmli, U. K. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*, *227*(5259), 680–685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
- Osuna-Gallardo, E. I., Cuevas-Rodríguez, E. O., Sepúlveda-García, C. I., Reyes-Moreno, C., León-López, L., Han, R., & Hernández-Álvarez, A. J. (2023). Impact of cooking and extrusion processing on nutritional, antinutritional, and techno-functional characteristics of indigenous bean (*Phaseolus coccineus*). *ACS Food Science & Technology*, *3*(11), 1835–1853. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.2c00416>
- Padilla, F. C., Guédez, T., Alfaro, M. J., Regnault, M., & Rincón C, A. M. (2010). Fraccionamiento y caracterización de las proteínas solubles de la harina de nuez de Barinas (*Caryodendron orinocense* K.). *Revista Del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, *41*(1), 38–42. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-04772010000100006&lng=es&tlng=es
- Perazzini, R., Leonardi, D., Ruggeri, S., Alesiani, D., D’Arcangelo, G., & Canini, A. (2008). Characterization of *Phaseolus vulgaris* L. landraces cultivated in central Italy. *Plant Foods for Human Nutrition*, *63*(4), 211–218. <https://doi.org/10.1007/s11130-008-0095-7>
- Polak, R., Phillips, E. M., & Campbell, A. (2015). Legumes: Health benefits and culinary approaches to increase intake. *Clinical Diabetes*, *33*(4), 198–205. <https://doi.org/10.2337/diaclin.33.4.198>
- Prandi, B., Zurlini, C., Maria, C. I., Cutroneo, S., Di Massimo, M., Bondi, M., Brutti, A., Sforza, S., & Tedeschi, T. (2021). Targeting the nutritional value of proteins



- from legumes by-products through mild extraction technologies. *Frontiers in Nutrition*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.695793>
- Raya-Pérez, J. C., Gutiérrez-Benicio, G. M., Ramírez Pimentel, J. G., Covarrubias-Prieto, J., & Aguirre-Mancilla, C. L. (2014). Caracterización de proteínas y contenido mineral de dos variedades nativas de frijol de México. *Agronomía Mesoamericana*, 25(1), 1–11. <https://www.redalyc.org/journal/437/43730495001/movil/>
- Redondo-Cuenca, A., Pedrosa, M. M., Sanz, M. D. T., Alvarado López, A. N., & Garcia-Alonso, A. (2022). Influence of high-pressure processing on nutritional composition and bioactive compounds of *Phaseolus coccineus* L. *Journal of Food Science*, 87(12), 5289–5302. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16361>
- Ruíz-Salazar, R., Hernández-Delgado, S., Vargas-Vázquez, M. L. P., & Mayek-Pérez, N. (2021). Current status of the genetic resources of *Phaseolus coccineus* (Fabaceae) in Mexico. *Boletín de La Sociedad Argentina de Botánica*, 56(3), 289–305. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v56.n3.32297>
- San Pablo-Osorio, B., Mojica, L., & Urías-Silvas, J. E. (2019). Chia seed (*Salvia hispanica* L.) pepsin hydrolysates inhibit angiotensin-converting enzyme by interacting with its catalytic site. *Journal of Food Science*, 84(5), 1170–1179. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14503>
- Sánchez-Arteaga, H. M., Urías-Silvas, J. E., Espinosa-Andrews, H., & García-Márquez, E. (2015). Effect of chemical composition and thermal properties on the cooking quality of common beans (*Phaseolus vulgaris*). *CYTA - Journal of Food*, 13(3), 385–391. <https://doi.org/10.1080/19476337.2014.988182>
- Tuna, A., Ortiz-Solà, J., López-Mas, L., Baser, F., Kallas, Z., Aguiló-Aguayo, I., Gulec, S., Ozen, B., & Tokatli, F. (2024). Development of a yeast-free bread using legume and nut flours in a gluten-free flour: Techno-functional characteristics and sensory evaluation. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(6), 3999–4010. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17153>
- Vargas-Vázquez, P., Muruaga-Martínez, J. S., Martínez-Villarreal, S. E., Ruiz-Salazar, R., Hernández-Delgado, S., & Mayek-Pérez, N. (2011). Diversidad morfológica del frijol ayocote del Carso Huasteco de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(3), 767–775. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.3.698>
- Vázquez Mendoza, M. (2021). *Análisis de las propiedades fisicoquímicas de tostadas de maíz y frijol ayocote (Phaseolus coccineus)*. Universidad Politécnica de Francisco I. Madero.
- Vázquez-Herrera, P., & Taboada-Gaytán, O. R. (2023). Prolonged storage affects the nutritional quality and cooking time of ayocote beans. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(29), e3542. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i29.3542>
- Yang, J. S., Dias, F. F. G., Pham, T. T. K., Barile, D., & de Moura Bell, J. M. L. N. (2024). A sequential fractionation approach to understanding the physico-



chemical and functional properties of aqueous and enzyme-assisted aqueous extracted black bean proteins. *Food Hydrocolloids*, 146, 109250. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109250>



Rendimiento productivo de un sistema acuapónico: análisis comparativo entre modalidad escalonada y por lotes

Jesús Josafat De León-Ramírez^{1*}, Juan Fernando García-Trejo¹, Carlos Francisco Sosa-Ferreya², Leticia Félix-Cuencas¹ y Samuel López-Tejeida¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, El Marqués, Querétaro, México.

²Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Medicina, Querétaro, México.

*Autor de correspondencia: leonjjrmz@gmail.com

Palabras clave:

cultivo escalonado, cultivo por lotes, desempeño productivo, sistemas acuapónicos.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 191-203.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14712769>

Recibido: 17 de agosto 2024
Revisado: 11 de noviembre 2024
Aceptado: 29 de noviembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Resumen

Este estudio determinó el rendimiento productivo de un sistema acuapónico intensivo de tilapia (*O. niloticus*) y tomate (*S. lycopersicum*) operado bajo las modalidades por lotes (SAL) y escalonado (SAE) durante un ciclo productivo de 180 días. Se establecieron las siguientes variables de respuesta: en las plantas, peso seco (PS), tasa de crecimiento relativo (RGR), tasa de crecimiento del cultivo (CGR), tasa de supervivencia (SR) y producción por planta (PP). Para los peces las variables fueron: tasa de crecimiento (GR), factor de conversión alimenticia (FCR), tasa de eficiencia proteica (PER) y tasa de supervivencia (FSR). Los resultados mostraron que ambos sistemas mantienen condiciones adecuadas para el cultivo, pero el sistema escalonado (SAE) demostró un eficiencia productiva mayor en 35%. Estos hallazgos destacan la importancia del manejo adecuado en la acuaponía para maximizar el rendimiento y la sostenibilidad del cultivo.

Introducción

La acuaponía se refiere al cultivo de peces y plantas en un mismo sistema de producción, en donde los residuos generados de la alimentación y metabolismo de los peces se transforman mediante conversión microbiana en nutrientes para las plantas, las cuales a su vez depuran y limpian el agua para los peces (Liang & Chien, 2013; Wongkiew et al., 2017; Li et al., 2018). Lo anterior resulta en el aprovechamiento integral de los recursos, con



una mínima liberación de nutrientes y aguas residuales. Con lo cual la acuaponía se posiciona como una alternativa de interés para la producción de alimentos en áreas con recursos limitados (Cerozi & Fitzsimmons, 2017).

Al interior de su sistema de cultivo acuapónico existen diversos factores que inciden directamente sobre el rendimiento del sistema, entre ellos, las variables fisicoquímicas del agua, tales como la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y la concentración de compuestos nitrogenados (Sace & Fitzsimmons, 2013; Knaus & Palm, 2017). Asimismo, la selección de especies de peces y plantas, la densidad de cultivo y la calidad de los alimentos proporcionados son factores determinantes en la productividad del sistema (Yavuzcan et al., 2017; Estim et al., 2018). Por lo tanto, un manejo adecuado de estos factores es fundamental para mantener un equilibrio en el sistema y, a su vez, asegurar una buena producción.

En la acuaponía, al igual que en la acuicultura, los sistemas pueden ser operados bajo dos modalidades; por lotes, donde la producción se organiza en ciclos definidos y escalonada, en la que la producción se desarrolla de manera continua. La modalidad por lotes es la más mayormente utilizada debido a su simplicidad en cuanto a manejo y planificación. Sin embargo, esta modalidad puede presentar fluctuaciones en la calidad del agua y las concentraciones de nutrientes, lo que impacta en la productividad del sistema (Rakocy et al., 2003; Calone et al., 2019; Félix-Cuencas et al., 2021).

Por otro lado, la modalidad escalonada proporciona un flujo constante de nutrientes y una reduce la variación en la calidad del agua (Rakocy et al., 2003; Goddek et al., 2019). Pese a ello, esta modalidad ha sido menos abordada resultando en la carencia de estudios que analicen las diferencias en cuanto al rendimiento entre las dos estrategias de manejo. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es determinar el rendimiento productivo de un sistema acuapónico intensivo de tomate (*S. lycopersicum*) y tilapia (*O. niloticus*) operado bajo las modalidades escalonada y por lotes.

Materiales y Métodos

El presente trabajo se llevó a cabo en la unidad acuícola del campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, en un área de 100 m² ubicada dentro de una estructura de invernadero (calibre 720), durante el período comprendido entre mayo y octubre.

Sistemas de cultivo

Se utilizaron seis sistemas acuapónicos, cada uno de ellos conformado por seis estanques de geomembrana con capacidad de 100 litros, un biofiltro tipo canasta, un reservorio de agua de 10 litros (para riego de las plantas) y cuatro camas de sustrato (fibra de coco) de 5.0 x 0.25 m cada una, con una superficie total de 5 m² (Figura 1).

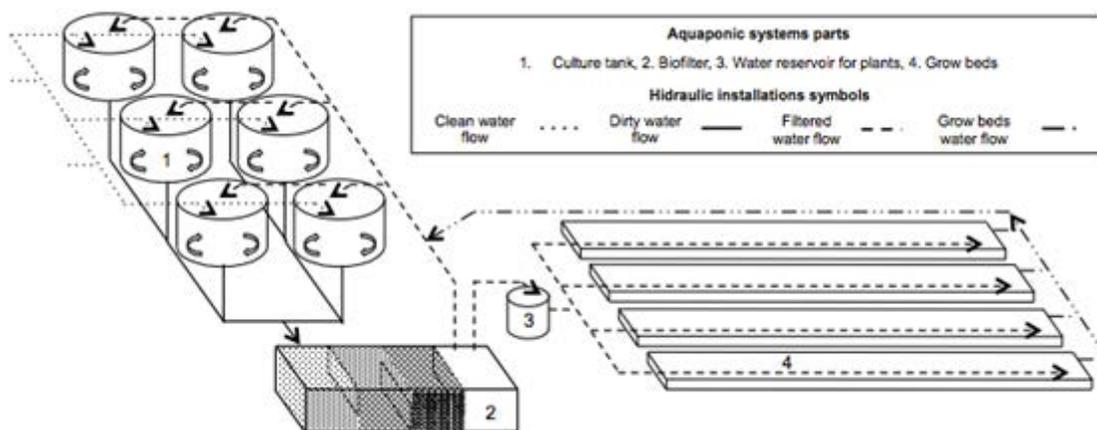


Figura 1. Esquema general de los sistemas acuapónicos utilizados
Fuente: elaboración propia

Material biológico

Se utilizaron 240 plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* var. rio grande) de 40 días de germinación con una altura media inicial de $26,85 \pm 2.63$ centímetros. Asimismo, se utilizaron 432 alevines de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) con un peso medio inicial de $4,81 \pm 0,06$ gramos; 144 juveniles con un peso medio inicial de $50,85 \pm 0,04$ gramos y finalmente 144 adultos con un peso medio inicial de $150,85 \pm 0,04$ gramos. Durante el periodo experimental (180 días), las plantas de tomate fueron regadas tres veces al día, variando el volumen total de acuerdo con el estadio fisiológico (Tabla 1). Por su parte, los ejemplares de tilapia fueron alimentados tres veces al día con una dieta comercial y plan de alimentación de la marca MaltaCleyton® (Tabla 2).

Tabla 1. Descripción del manejo de la planta durante el periodo experimental

Etapa	Volumen de riego por planta	Horarios y ración de riego	Acciones particulares por etapa
Vegetativa	1.5 L	10:00 am (30 %)	Inicio de tutorero
Floración	2.4 L	14:00 pm (40 %)	Poda de hojas y brotes axiales
Fructificación	3.6 L		Clareo de frutos (6 por racimo)
Maduración	2.4 L	16:00 pm (30 %)	Corte de frutos (madurez 4)

Fuente: Mercado-Luna, 2007



Tabla 2. Descripción del plan de alimentación utilizado, la cantidad de alimento suministrado se ajustó en función de los datos biométricos semanales

Etapa	Rango de peso por pez	Porcentaje diario de alimento	Horarios de alimentación
Alevín	5 – 20 g	8 %	8:00 am (30 %)
Alevín	20 – 50 g	5 %	13:00 pm (40 %)
Juvenil	50 – 150 g	4 %	
Adulto	150 – 300 g	2 %	18:00 pm (30 %)

Fuente: MaltaCleyton®

Diseño experimental

Se contemplaron dos tratamientos con tres repeticiones: SAL = sistema acuapónico por lotes y SAE = sistema acuapónico escalonado (Tabla 3). En el tratamiento de manejo por lotes (SAL) y sus repeticiones se introdujeron 16 alevines en cada estanque del sistema (288 individuos en total). Para el inicio del tratamiento escalonado (SAE) y sus repeticiones se introdujeron 48 alevines en un estanque de cada sistema (144 totales), 24 tilapias juveniles en dos estanques por sistema (144 totales) y 16 tilapias adultas en tres estanques de cada sistema (144 individuos en total). Cada tratamiento (SAL y SAE) y sus repeticiones contaron con 10 plantas en cada cama de sustrato para un total de 40 plantas por sistema.

Tabla 3. Descripción del manejo de los peces en los tratamientos experimentales AB y AS, así como los controles utilizados

Acciones particulares por tratamiento	
SAL	SAE
Los peces de cada estanque (16) permanecieron en el mismo hasta el momento de la cosecha (180 días).	Cambios realizados a los 60 y 120 días del experimento 1. Los peces adultos fueron cosechados. 2. Los juveniles se redistribuyeron en los tres estanques para la etapa adulta. 3. Los alevines se redistribuyeron en los dos estanques para la etapa juvenil. 4. En el estanque para alevines se ingresaron nuevamente 48 individuos.

SAL: sistema acuapónico por lotes y SAE: sistema acuapónico escalonado.

Fuente: elaboración propia

Calidad del agua

El agua presente en los estanques fue monitoreada para las variables de temperatura, oxígeno disuelto y pH mediante un equipo Hach HQ40d®. Asimismo, se monitorearon las concentraciones de nitratos, nitritos y amoníaco no ionizado, los cuales fueron determinados mediante el espectrofotómetro Hach DR6000® bajo el método 8039, 8057 y 8038 respectivamente. Por otro lado, el agua destinada al riego de plantas fue monitoreada para las variables de oxígeno disuelto y pH con un equipo Hach HQ40d®. Cuando fue requerido, el pH fue ajustado a un valor



de 6 con ácido cítrico (Kang et al., 2011; Suárez-Cáceres et al., 2021); finalmente la conductividad eléctrica se monitoreó con el equipo Hanna® HI 98130.

Desempeño productivo

Para evaluar el efecto de la modalidad de cultivo acuapónico sobre el desempeño productivo de *S. lycopersicum*, se establecieron las siguientes variables de respuesta: peso seco (PS), tasa de crecimiento relativo (TCR), tasa de crecimiento del cultivo (TCC), tasa de supervivencia (TS) y producción por planta (PP). Mientras que, para *O. niloticus*, las variables de respuesta consideradas fueron: tasa de crecimiento (TC), factor de conversión alimenticia (FCA), eficiencia proteica (EP) y tasa de supervivencia (TSP). Finalmente, se realizó una relación costo-beneficio (RCB) para cada tratamiento.

$$\text{Peso seco (PS)} = \text{peso en gramos de la planta traa deshidratación a } 70 \text{ }^\circ\text{C durante } 72 \quad (1)$$

$$\text{Tasa de crecimiento relativo (TCR)} = \frac{(\ln PS_f - \ln PS_i)}{t} \quad (2)$$

$$\text{Tasa del crecimiento del cultivo (TCC)} = \frac{(1)(PS_f - PS_i)}{(SS)(T_2 - T_1)} \quad (3)$$

Donde: PS_f es el peso seco final, PS_i peso inicial de la planta, SS es la superficie del suelo en cm² y T₂, T₁ tiempo en días.

$$\text{Tasa de sobrevivencia (TS)} = \frac{\text{Numero final de plantas}}{\text{Numero inicial de plantas}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Producción por planta (PP)} = \frac{\text{kilogramos de tomate}}{\text{m}^2} \quad (5)$$

$$\text{Tasa de crecimiento (TC)} = \text{Peso final (g)} - \text{Peso inicial (g)} \quad (6)$$

$$\text{Factor de conversión alimenticia (FCA)} \% = \frac{\text{gramos de alimento consumido}}{\text{gramos de incremento en peso}} \quad (7)$$

$$\text{Eficiencia proteica (EP)} \% = \frac{\text{gramos de incremento en peso}}{\text{gramos de protein consumidos}} \quad (8)$$

$$\text{Tasa de sobrevivencia en peces (TSP)} = \frac{\text{Numero final de peces}}{\text{Numero inicial de peces}} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{Relación costo-beneficio (RCB)} = \frac{\text{Beneficios totales}}{\text{Costos totales}} \quad (10)$$



Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó mediante el software JMP® (9.0.1). Los datos recolectados para cada una de las variables fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) expresando los resultados como media \pm desviación estándar. Asimismo, se realizó la prueba de Tukey para determinar las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, utilizando un nivel de significancia $P < 0,05$.

Resultados y Discusión

Calidad del agua

Durante los 180 días de experimentación, los valores obtenidos en el monitoreo de la calidad del agua de los estanques se encontraron dentro de los rangos de tolerancia para el cultivo de *O. niloticus* (Tabla 4). Las variables de temperatura y pH en el agua de los peces no mostraron diferencias significativas, descartándose su interferencia sobre el comportamiento de los tratamientos. Por otra parte, la diferencia en la concentración de oxígeno disuelto está relacionada con el número de organismos en cada tratamiento. Siendo que la distribución escalonada implica un mayor número de individuos en el sistema y con ello mayor consumo de oxígeno (Tomalá et al., 2014). A pesar de lo anterior, los valores de oxígeno disuelto se mantuvieron dentro del rango de cultivo (Timmons & Ebeling, 2010), por lo que se infiere que dicha variable no limitó el crecimiento de los peces.

Tabla 4. Calidad del agua en los estanques durante el período experimental

Variable	Valores de referencia	SAL	SAE
Temperatura (°C)	20 - 32	24.4 \pm 1.3 ^a	24.2 \pm 1.2 ^a
pH	5 - 9	7.8 \pm 0.4 ^a	7.9 \pm 0.6 ^a
Oxígeno disuelto (mg/l)	4 - 9	6.95 \pm 0.45 ^a	5.31 \pm 0.52 ^b
Nitratos (mg/l)	< 300	39.32 \pm 3.65 ^a	28.37 \pm 2.96 ^b
Nitritos (mg/l)	< 5	1.96 \pm 0.26 ^a	1.17 \pm 0.21 ^b
Amonio no ionizado (mg/l)	< 2	1.18 \pm 0.14 ^a	0.76 \pm 0.09 ^b

Los valores se presentan como media \pm desviación estándar de las muestras colectadas. Valores con superíndices diferentes presentan diferencias significativas ($P < 0,05$). SAL: sistema acuapónico por lotes y SAE: sistema acuapónico escalonado.

Fuente: Elaboración propia

Los valores de la concentración de nitratos son comparables a los reportados por Roosta & Hamidpour (2011) y Yang & Kim (2019) en cultivos acuapónicos de tilapia-tomate, donde se obtuvieron concentraciones de 34.6 mg/L y 32.5 mg/L, respectivamente. En este estudio el valor presente en SAE ligeramente menor frente a SAL podría estar relacionado con una mayor tasa de absorción por parte de las plantas, lo que reduciría la acumulación de este compuesto en el agua del sistema (Reyes-Flores et al., 2017). Esto también podría explicar el mayor rendimiento obte-



nido, siendo que los nitratos son cruciales para el desarrollo vegetal siendo superior en 56 % y 95 % respectivamente de los trabajos mencionados.

En cuanto a los nitritos, el valor presente en SAL podría indicar un proceso de nitrificación menos eficiente, donde los nitritos no fueron convertidos adecuadamente en nitratos (Schmautz et al., 2016). Con respecto al amonio no ionizado, el comportamiento fue el mismo, siendo SAL el tratamiento con mayor concentración. Este resultado podría relacionarse a una mayor acumulación del compuesto en el sistema proveniente desde la etapa de alevín (Rakocy et al., 2003; Félix-Cuencas et al., 2021). Sin embargo, al igual que en los demás compuestos nitrogenados pese a las discrepancias, los niveles se mantuvieron dentro de rangos seguros para la tilapia (Timmons & Ebeling, 2010).

Los valores en los reservorios de agua para el riego de plantas se mantuvieron en el rango adecuado para el cultivo de *S. lycopersicum* (Tabla 5), lo que excluye la calidad del agua como un factor de intervención negativa sobre el objetivo del experimento. Los valores de pH en ambos sistemas estuvieron ligeramente por debajo del valor óptimo; no obstante, se encuentran en el rango que permite la correcta absorción de nutrientes (Sonneveld & Voogt, 2009). Los valores de conductividad eléctrica presentaron diferencias significativas a favor de SAE, lo que podría relacionarse con la presencia de peces en diferentes etapas de desarrollo. Esta variación implica una alimentación diversa, que contribuye de forma distinta a la producción de desechos nitrogenados, los cuales son transformados en nutrientes para las plantas (Goddek et al., 2020).

Tabla 5. Calidad del agua en los tanques para riego de plantas durante el período experimental

Variable	Valores de referencia	SAL	SAE
pH	5.5 - 6.5	5.7 ± 0.2 ^a	5.9 ± 0.3 ^a
Oxígeno disuelto (mg/l)	5 - 8	4.65 ± 0.34 ^a	4.82 ± 0.26 ^a
Conductividad eléctrica (mS)	1.5 - 2.5	1.8 ± 0.1 ^b	2.2 ± 0.2 ^a

Los valores se presentan como media ± desviación estándar de las muestras colectadas. Valores con superíndices diferentes presentan diferencias significativas ($P < 0,05$). SAL: sistema acuapónico por lotes y SAE: sistema acuapónico escalonado.

Fuente: elaboración propia

Desempeño productivo

Los datos de desempeño productivo en las plantas presentaron diferencias significativas (Tabla 6). Los valores sobresalientes para las variables de PS, TCR, TCC y PP se generaron en SAE; mientras que la variable de sobrevivencia (TS) no mostró diferencia entre tratamientos ($P < 0,05$). El peso seco de las plantas en SAE fue significativamente mayor pudiendo relacionarse con una mayor disponibilidad de nutrientes en el sistema. La tasa de crecimiento relativo y del cultivo presentó el mismo comportamiento que el PS, lo que concuerda con lo reportado por Wongkiew et al. (2017) donde mencionan que el manejo escalonado favorece al rendimiento



del cultivo. La producción por planta fue significativamente mayor en SAE. Esto destaca la eficiencia del manejo escalonado para optimizar la producción vegetal, lo que coincide con lo mencionado por Kloas et al. (2015), quienes observaron un incremento en la productividad de las plantas regadas con agua proveniente de peces de diferentes tamaños.

Tabla 6. Comportamiento productivo de *S. lycopersicum*. Los valores se presentan como media \pm desviación estándar del peso seco (PS), tasa de crecimiento relativo (TCR), tasa de crecimiento del cultivo (TCC), tasa de supervivencia (TS) y producción por planta (PP) al final de los 180 días de experimentación

Variable	SAL	SAE
PS (g)	285.24 \pm 15.34 ^b	314.67 \pm 13.62 ^a
TCR	0.0413 \pm 0.0005 ^b	0.0423 \pm 0.0004 ^a
TCC	0.0354 \pm 0.0003 ^b	0.0381 \pm 0.0002 ^a
TS (%)	70.2 \pm 4.7 ^a	74.1 \pm 6.1 ^a
PP (g)	627.64 \pm 31.54 ^b	783.23 \pm 22.87 ^a

Los valores se presentan como media \pm desviación estándar de las muestras colectadas. Valores con superíndices diferentes presentan diferencias significativas ($P < 0,05$). SAL: sistema acuapónico por lotes y SAE: sistema acuapónico escalonado.

Fuente: elaboración propia

Por otra parte, en el comportamiento productivo de los peces (Tabla 7), la TC en alevines fue significativamente mayor en SAL. Esta diferencia puede explicarse por la densidad de peces en cada sistema (Ani et al., 2022). La menor densidad en SAL pudo influir en la competencia por los recursos; situación contraria a SAE donde la competencia también pudo generar un entorno de estrés, lo que podría mermar la tasa de crecimiento (Wu et al., 2015; Yavuzcan et al., 2017). Los resultados de las variables FCA, EP y TS también reflejan el impacto de la densidad de peces; en el tratamiento SAL, una menor cantidad de peces permitió un entorno con menos competencia y menor estrés, lo que facilitó una conversión alimenticia más eficiente mediante un mejor aprovechamiento de las proteínas del alimento. En contraste, los factores asociados a una mayor densidad en SAE pueden haber incrementado la mortalidad de los peces (Wu et al., 2015; Setiadi et al., 2018).

Tabla 7. Comportamiento productivo de *O. niloticus*. Los valores se presentan como media \pm desviación estándar de la tasa de crecimiento (TC), factor de conversión alimenticia (FCA), eficiencia proteica (EP) y tasa de supervivencia (TSP), al final de la etapa de alevín, juvenil y adulto (60, 120 y 180 días respectivamente).

Variable	SAL			SAE		
	Alevín	Juvenil	Adulto	Alevín	Juvenil	Adulto
TC (g)	59.32 \pm 4.09 ^a	91.46 \pm 3.89 ^b	102.15 \pm 6.27 ^b	48.77 \pm 4.11 ^b	99.79 \pm 4.23 ^a	118.45 \pm 4.92 ^a
FCA	1.95 \pm 0.06 ^b	1.85 \pm 0.07 ^a	1.79 \pm 0.08 ^a	2.13 \pm 0.07 ^a	1.74 \pm 0.09 ^a	1.56 \pm 0.08 ^b
EP	1.26 \pm 0.03 ^a	1.57 \pm 0.05 ^b	1.73 \pm 0.07 ^b	1.17 \pm 0.05 ^b	1.64 \pm 0.06 ^a	1.85 \pm 0.05 ^a
TSP (%)	91.8 \pm 4.2 ^a	93.3 \pm 2.8 ^a	95.2 \pm 2.1 ^b	83.6 \pm 3.8 ^b	94.3 \pm 3.3 ^a	98.5 \pm 1.1 ^a

Los valores se presentan como media \pm desviación estándar de las muestras colectadas. Valores con superíndices diferentes presentan diferencias significativas ($P < 0,05$). * Variables adimensionales; SAL: sistema acuapónico por lotes y SAE: sistema acuapónico escalonado.

Fuente: elaboración propia



En la etapa juvenil el valor de TC favoreció el tratamiento escalonado (SAE), esto pese a contar con mayor densidad de organismos, por lo cual el resultado podría deberse al menor contenido de compuestos nitrogenados en este tratamiento con respecto a SAL, donde la mayor concentración de estos compuestos podría haber mermado ligeramente el crecimiento (Grabner & Junge, 2009; Goddek et al., 2015). El valor de FCA fue similar entre los tratamientos; sin embargo, la mayor eficiencia proteica (EP) se presentó en SAE, indicando una mejor asimilación de las proteínas en el alimento. Esto coincide con lo mencionado por Rakocy et al. (2006), donde se reporta una mejora en la eficiencia proteica con una mayor densidad de peces al ser acompañada de valores cercanos al óptimo en las condiciones fisicoquímicas del agua (temperatura 28 °C, pH 6, oxígeno disuelto 6 mg/l). Finalmente, las tasas de sobrevivencia no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos, puesto que ambos sistemas mantuvieron la calidad de agua dentro de los valores de referencia para el desarrollo de los juveniles (Tabla 4).

En la etapa de adulto, la tasa de crecimiento (TC) fue significativamente mayor en SAE, este resultado puede estar relacionado con una menor acumulación de compuestos nitrogenados en el agua de dicho sistema, lo que favoreció el crecimiento de los peces (Ibrahim & Naggar, 2010). De igual manera, los valores de FCA y EP fueron superiores en el tratamiento escalonado (SAE). Además, la tasa de sobrevivencia también favoreció a SAE, lo que puede atribuirse a las condiciones de agua más estables y con ello menores factores de estrés en este sistema, lo cual ha sido reportado como un punto crucial para mejorar la supervivencia en sistemas acuapónicos (Yavuzcan et al., 2017).

Para la relación costo-beneficio (RCB), se consideró como “costo” únicamente los gastos operativos durante el ciclo productivo de 180 días; mientras que, como “beneficio”, se tomó en cuenta el ingreso por venta de los productos obtenidos en cada sistema (Tabla 8). El valor de RCB obtenido en el cultivo por lotes (SAL) es ligeramente menor al valor de referencia 1, siendo esto negativo para su viabilidad económica. En cambio, el valor de RCB en SAE indica su viabilidad económica; no obstante, con mejoras en ambos sistemas, la relación costo-beneficio podría incrementarse. De igual manera se destaca que bajo el manejo escalonado se obtienen mayores rendimientos en ambas especies, con un aumento del 48 % en tilapia y 16 % en tomate.

Tabla 8. Relación costo-beneficio de los tratamientos

	SAL	SAE
Costo (instalación y operativos)		
Alimento	\$ 720	\$ 685
Electricidad	\$ 1180	\$ 1180
Agua	\$ 360	\$ 360



Ácido cítrico (ajuste de pH)	\$ 212	\$ 229
Alevines / plántulas	\$ 500	\$ 1350
Costo total	\$ 2952	\$ 3804
<hr/>		
Beneficio (ingresos por ventas)		
<hr/>		
Tilapia	\$ 2170 *	\$ 4130 **
Tomate	\$ 717	\$ 865
Beneficio total	\$ 2887	\$ 4995
<hr/>		
Relación costo - beneficio	0.97	1.31

* El monto corresponde a la única cosecha realizada. ** El 80 % del monto corresponde a las tres cosechas realizadas, mientras que el porcentaje restante corresponde a los peces que permanecen en el sistema. Los montos fueron calculados con base al precio promedio por kilo del 16 - 31 de julio 2024 (\$27 jitomate y \$100 tilapia).

Fuente: Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (2024) <http://www.economia-sniim.gob.mx/>

Conclusión

El estudio demuestra que ambos sistemas acuapónicos (SAL y SAE), operando con una densidad intensiva de peces (40 kg/m³), son capaces de mantener condiciones óptimas para el cultivo de *O. niloticus* y *S. lycopersicum*. Sin embargo, el sistema escalonado (SAE) destacó sobre el cultivo por lotes SAL por su mayor eficiencia tanto en términos productivos (52% más de biomasa) como económicos (35% más de utilidad), ubicándose como una opción más viable para su aplicación en el ámbito comercial; ya que este sistema no solo mejora el rendimiento de los cultivos, sino que también maximiza el aprovechamiento de los recursos en al menos un 20%, haciéndolo más competitivo. Por otro lado, aunque el sistema SAL es funcional, necesita mejoras para incrementar su viabilidad económica.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo para su realización.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada al primer autor.

Referencias

Ani, J. S., Manyala, J. O., Masese, F. O., & Fitzsimmons, K. (2022). Effect of stocking density on growth performance of monosex Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in the aquaponic system integrated with lettuce (*Lactuca sativa*). *Aquaculture and Fisheries*, 7(3), 328-335. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.03.002>



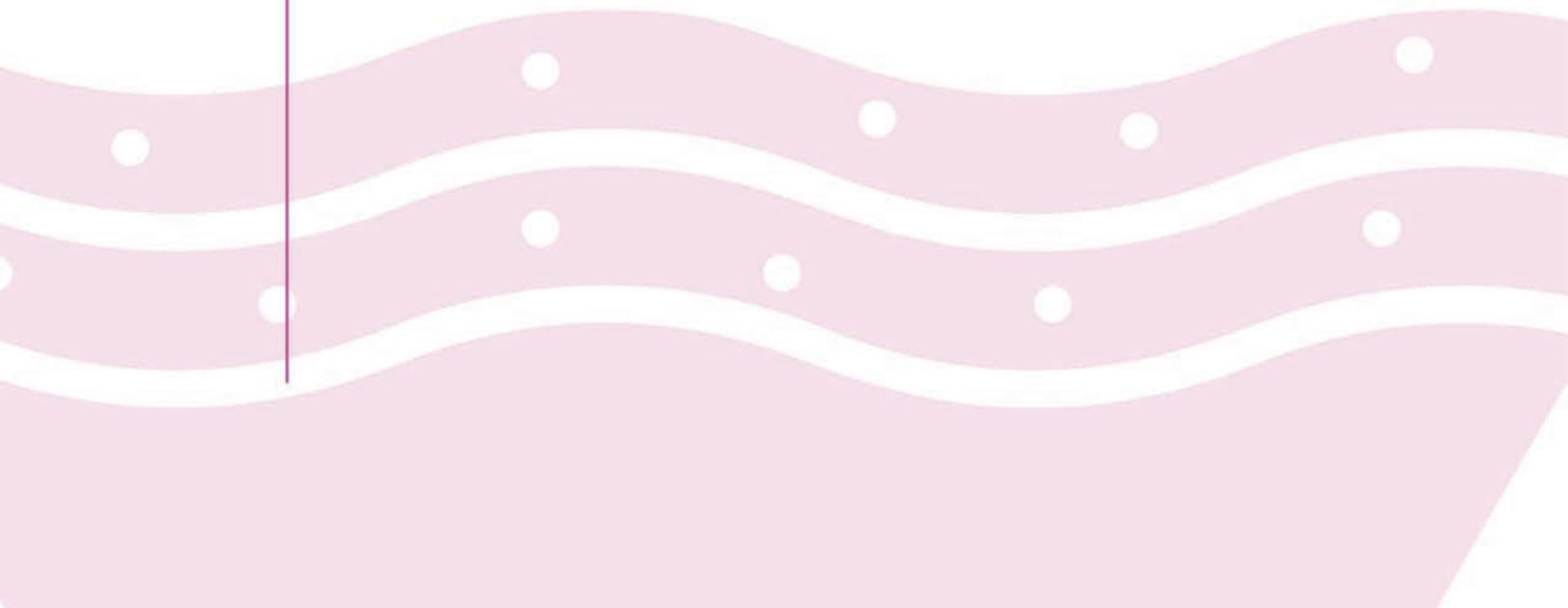
- Calone, R., Pennisi, G., Morgenstern, R., Sanyé-Mengual, E., Lorleberg, W., Dapprich, P., ... & Gianquinto, G. (2019). Improving water management in European catfish recirculating aquaculture systems through catfish-lettuce aquaponics. *Science of the total environment*, 687, 759-767. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.167>
- Cerozi, B. S., & Fitzsimmons, K. (2017). Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agricultural systems*, 153, 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.020>
- Estim, A., Saufie, S., Mustafa, S., (2018). Water quality remediation using aquaponics sub- systems as biological and mechanical filters in aquaculture. *Journal of Water Process Engineering*, 30, 100566. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.001>
- Félix-Cuencas, L., García-Trejo, J. F., López-Tejeida, S., León-Ramírez, J. J. D., & Soto-Zarazúa, G. M. (2021). Effect of three productive stages of tilapia (*Oreochromis niloticus*) under hyper-intensive recirculation aquaculture system on the growth of tomato (*Solanum lycopersicum*). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 49(5), 689-701. <http://dx.doi.org/10.3856/vol49-issue5-fulltext-2620>
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K.V., Jijakli, H., Thorarinsdottir, R., (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199-4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Goddek, S., & Keesman, K. J. (2020). Improving nutrient and water use efficiencies in multi-loop aquaponics systems. *Aquaculture International*, 28(6), 2481-2490. <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00600-6>
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (2019). *Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1-3), 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048>
- Ibrahim, N., & Naggar, G. E. (2010). Water quality, fish production and economics of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, and African catfish, *Clarias gariepinus*, monoculture and polycultures. *Journal of the World Aquaculture Society*, 41(4), 574-582. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2010.00397.x>
- Kang, Y. I., Park, J. M., Kim, S. H., Kang, N. J., Park, K. S., Lee, S. Y., & Jeong, B. R. (2011). Effects of root zone pH and nutrient concentration on the growth and nutrient uptake of tomato seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, 34(5), 640-652. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.540621>
- Knaus, U., & Palm, H. W. (2017). Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring- summer conditions in northern Germany (Mecklen-



- burg Western Pomerania). *Aquaculture*, 473, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.01.020>
- Kloas, W., Groß, R., Baganz, D., Graupner, J., Monsees, H., Schmidt, U., ... & Renert, B. (2015). A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquaculture Environment Interactions*, 7(2), 179-192. <https://doi.org/10.3354/aei00146>
- Li, C., Zhang, B., Luo, P., Shi, H., Li, L., Gao, Y., ... & Wu, W. M. (2018). Performance of a pilot scale aquaponics system using hydroponics and immobilized biofilm treatment for water quality control. *Journal of Cleaner Production*. 208, 274-284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.170>
- Liang, J. Y., & Chien, Y. H. (2013). Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia water spinach raft aquaponics system. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 693- 700. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.03.029>
- Mercado-Luna, A. (2007). *Manual de producción de jitomate (Lycopersicon esculentum) en variedades de crecimiento indeterminado bajo invernadero*. Universidad Autónoma de Querétaro
- Rakocy, J., Shultz, R. C., Bailey, D. S., & Thoman, E. S. (2003). Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. *ISHS Acta Horticulturae*, 648, 63-69. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.8>
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics—integrating fish and plant culture (publication no. 454)*. Southern Regional Aquaculture Center. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/284496499_Recirculating_aquaculture_tank_production_systems_Aquaponics-Integrating_fish_and_plant_culture
- Reyes-Flores, M., M. Sandoval-Villa., M. N. Rodríguez-Mendoza., L. I. Trejo-Téllez., J. Sánchez- Escudero y J. Reta-Mendiola. (2017). Concentración de nutrientes en efluente acuapónico para producción de *Solanum lycopersicum* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (17), 3529-3542. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5884041>
- Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2011). Effects of foliar application of some macro-and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 129(3), 396-402. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.006>
- Sace, C.F. & Fitzsimmons, K.M., (2013). Vegetable production in a recirculating aquaponics using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with and without freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *Academia Journal of Agricultural Research*. 1(12), 236–250. <https://doi.org/full/10.5555/20143125738>



- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Griessler Bulc, T., & Junge, R. (2016). Tomato productivity and quality in aquaponics: comparison of three hydroponic methods. *Water*, 8(11), 533. <https://doi.org/10.3390/w8110533>
- Setiadi, E., Widyastuti, Y. R., & Prihadi, T. H. (2018). Water Quality, Survival, and Growth of Red Tilapia, *Oreochromis niloticus* Cultured In Aquaponics System. *E3S Web of Conferences*, 47, 02006. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/20184702006>
- Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. (2024). *Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados*. Secretaría de Economía. Recuperado de <http://www.economia-sniim.gob.mx/>
- Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). Nutrient solutions for soilless cultures. En C. Sonneveld & W. Voogt (eds.), *Plant nutrition of greenhouse crops* (pp. 257-275). Springer Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6_12
- Suárez-Cáceres, G. P., Pérez-Urrestarazu, L., Avilés, M., Borrero, C., Eguíbar, J. R. L., & Fernández-Cabanás, V. M. (2021). Susceptibility to water-borne plant diseases of hydroponic vs. aquaponics systems. *Aquaculture*, 544, 737093. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737093>
- Tomalá, D., Chavarría, J., & Escobar, B. E. (2014). Evaluación de la tasa de consumo de oxígeno de *Colossoma macropomum* en relación al peso corporal y temperatura del agua. *Latin American Journal Aquatic Reserch*, 42(5), 971-979. <http://dx.doi.org/10.3856/vol42-issue5-fulltext-4>
- Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2010). *Recirculating aquaculture*. Cayuga Aqua Ventures.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J. W., & Khanal, S. K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering*, 76, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>
- Wu, H., Aoki, A., Arimoto, T., Nakano, T., Ohnuki, H., Murata, M., ... & Endo, H. (2015). Fish stress become visible: A new attempt to use biosensor for real-time monitoring fish stress. *Biosensors and Bioelectronics*, 67, 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.09.015>
- Yang, T., & Kim, H. J. (2019). Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems. *Scientia Horticulturae*, 256, 108619. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108619>
- Yavuzcan Yildiz, H., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review. *Water*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.3390/w9010013>



Una aproximación a la cadena de valor del pulpo maya

María Laura García-Pérez¹, Luis Alberto Olvera-Vargas², Horacio Bautista-Santos³, Loecelia Ruvalcaba-Sánchez⁴ y Yair Romero-Romero^{2*}

¹Estudiante del Doctorado en Estudios Económicos (DEEC) Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas (CUCEA) de la Universidad de Guadalajara Periférico Norte No. 799 Núcleo Universitario, Los Belenes, 45100, Zapopan, México.

²Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) comisionado al Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ). Av. Normalistas 800 Colinas de La Normal, Guadalajara, Jalisco, México. C.P. 44270.

³Tecnológico Nacional de México (TecNM)/ ITS de Tantoyuca, Veracruz, México. Desviación Lindero Tametate S/N, La Morita, Tantoyuca, Veracruz. C.P. 92100.

⁴Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (Centro Geo), Contoy 137, Col. Lomas de Padriana, Alcaldía Tlalpan, C.P., Ciudad de México 14240.

*Autor de correspondencia: yromero@ciatej.mx

Resumen

Palabras clave:

cadena de valor, competitividad, pulpo maya.

Este artículo analiza la cadena de valor del pulpo maya en Yucatán, destacando la dependencia de la exportación de producto congelado con escaso valor agregado, lo que reduce los márgenes de ganancia y aumenta la vulnerabilidad económica del sector. La metodología empleada se fundamenta en el modelo de la cadena de valor de Porter, con un enfoque en la identificación de actores clave, relaciones entre ellos y oportunidades para generar mayor valor. Los resultados revelan que la falta de infraestructura adecuada y el acceso limitado al financiamiento son las principales barreras que obstaculizan la industrialización y comercialización eficiente del pulpo maya. Para abordar estos desafíos, se proponen estrategias enfocadas en la transformación del producto hacia bienes de mayor valor agregado, el desarrollo de infraestructura, la equidad en la distribución de beneficios y la garantía de trazabilidad del producto. Además, se destaca la importancia de adoptar modelos de colaboración multisectorial y de innovación como una vía para posicionar al pulpo maya como un producto distintivo en los mercados internacionales. Esta propuesta busca impulsar la sostenibilidad y competitividad del sector, beneficiando a los actores involucrados y fortaleciendo su impacto económico y social.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 205-220.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14720429>

Recibido: 13 de septiembre 2024
Revisado: 06 de diciembre 2024
Aceptado: 09 de enero 2025
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Introducción

México, ubicado entre los océanos Pacífico y Atlántico, se caracteriza por su vasta diversidad biológica y ecosistémica, lo que incluye una amplia gama de recursos y ecosistemas marinos (SEMARNAT, 2018). Esta riqueza natural ha sustentado históricamente la pesca como una actividad clave, no solo para el abastecimiento alimentario, sino también como fuente de empleo para miles de familias mexicanas (SIAP, 2020).

Entre los principales productos pesqueros de México, la sardina ocupó el primer lugar en 2023, representando el 35.50% del volumen total de la pesca marina. Le siguió la anchoveta, con un 14.54%, y el camarón en tercer lugar, aportando el 11.60%. Particularmente en el caso del pulpo, éste ocupó el décimo lugar a nivel nacional (1.40%), siendo Yucatán es el principal estado productor, con una captura de 20,033 toneladas en 2023, lo que representó el 66.45% del total nacional (CONAPESCA, 2024).

La pesca de pulpo en Yucatán se centra en dos especies: el pulpo común (*Octopus americanus*), que se encuentra a lo largo de las costas mexicanas, y el pulpo rojo (*Octopus maya*), endémico de la península de Yucatán. Este último, conocido como "pulpo maya," es altamente valorado por su textura y sabor, lo que lo convierte en un producto demandado no solo en México, sino también en mercados internacionales como Japón, Italia y otras regiones de Europa (IMIPAS, 2019).

A pesar de la relevancia del pulpo maya en el mercado nacional e internacional, la industria enfrenta varias limitaciones. Una de las principales es que el 97% de las exportaciones del pulpo son en su modalidad de congelado, sin ningún tipo de valor agregado (Rojas González et al., 2024). La dependencia de exportar materias primas con escaso o nulo valor agregado está asociada con una serie de consecuencias económicas negativas para los países exportadores, tales como baja productividad, ingresos volátiles, sobrevaloración de las tasas de cambio, inestabilidad económica y política, además de aumentar la vulnerabilidad ante el cambio climático y la sobreexplotación de recursos naturales (ONU, 2023).

En este contexto, el concepto de cadena de valor, introducido por Michael Porter (1998), se presenta como una estrategia competitiva (Medina et al., 2019). A través de su análisis es posible identificar los eslabones, procesos y actividades que generan valor. El término valor se entiende como aquello por lo que el cliente está dispuesto a pagar (Porter, 2021).

El análisis de la cadena de valor se puede llevar a cabo mediante el estudio de las actividades primarias, que incluyen la logística de entrada, operaciones, logística, mercadotecnia y ventas y servicio (Quintero & Sánchez, 2006), así como actividades de apoyo, como infraestructura de la empresa, administración de recursos humanos, desarrollo tecnológico y adquisiciones (Ayala-Garay et al., 2016; Quintero & Sánchez, 2006).



Por lo tanto, al considerar las problemáticas existentes en la industria del pulpo maya en Yucatán y las ventajas que ofrece el análisis de la cadena de valor, el objetivo de esta investigación es “identificar la cadena de valor del pulpo maya en Yucatán, con el fin de detectar áreas de oportunidad claves y, con base en ellas, proponer estrategias que aborden dichas oportunidades para mejorar la competitividad y sostenibilidad del sector”.

Materiales y Métodos

Para identificar la cadena de valor en el caso del pulpo maya, se considera la metodología propuesta por Ayala-Garay et al.(2016), la cual se basa en los principios establecidos por Porter (2001), pero que integra una serie de variables que permiten determinar el esquema de la cadena de valor, donde es posible identificar aquellos procesos específicos en los que se favorece la competitividad del producto (Tabla 1).

Tabla 1. Variables para determinar la cadena de valor

Variable	Descripción
Actores y funciones	• Mención acerca de los actores que componen la cadena, desde la pesca del producto hasta su comercialización hacia el consumidor final.
Relaciones horizontales	• Se describen las interacciones cooperativas entre los actores involucrados.
Información sobre el mercado	• Fortalezas • Oportunidades • Debilidades • Amenazas
Servicios críticos de apoyo	• Identificación de información relacionada con servicios financieros que brinden créditos a los pescadores y comercializadores.
Servicios de asistencia técnica	• Identificación de servicios que brindan asesoría técnica a los involucrados en los procesos de la cadena productiva.
Servicios de gestión de calidad	• Se mencionan los instrumentos utilizados para regular la pesca y el tratamiento del producto.
Inteligencia comercial	• Se establecen los aspectos relacionados con la cultura del consumo del producto, los aspectos que determinan su calidad y los atributos que la componen.
Logística y almacenamiento	• Mención sobre los agentes del sistema productivo que participan en su comercialización y almacenamiento.

Fuente: elaboración propia con base en Ayala-Garay et al., 2016.

La información analizada en esta investigación se obtuvo por fuentes secundarias, como resultados de encuestas, entrevistas y trabajo de campo realizados durante la cuarta semana de agosto del 2019. Estas actividades fueron parte del Proyecto de Plataforma tecnológica pulpo maya para el desarrollo de productos de alto valor agregado (YUC-2017-01-01-6559), llevado a cabo por el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ). Los resultados fueron presentados en los siguientes libros “Plan Estratégico: plataforma tecnológica pulpo maya para el desarrollo de productos de alto valor agregado” (Medina et al., 2019), “Inteligencia de Mercado: plataforma tecnológica pulpo maya” (Rivera et al., 2019) y “Diagnostico competitivo: Plataforma tecnológica pulpo maya” (Rivera et al., 2019b).



Además, se utilizan bases de datos del Consejo Nacional de Población (CONAPO) y el Módulo de Condiciones Socioeconómicas (MCS) generado por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL, 2005), así como datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019), la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2024a) y la empresa INTOR (2019).

Resultados y Discusión

En la figura 1 se muestra la cadena del pulpo en México, donde se observan los procesos de las actividades primarias en las que se incurre para que el producto extraído llegue al consumidor final. En primer lugar, está la extracción, que involucra tanto flotas mayores como menores, con pescadores que pueden pertenecer a una cooperativa o ser independientes. Una vez extraído el producto del mar, en la cadena se identifican varios intermediarios, entre los cuales se encuentran los pequeños intermediarios, los permisionarios, las cooperativas, las congeladoras y comercializadoras.

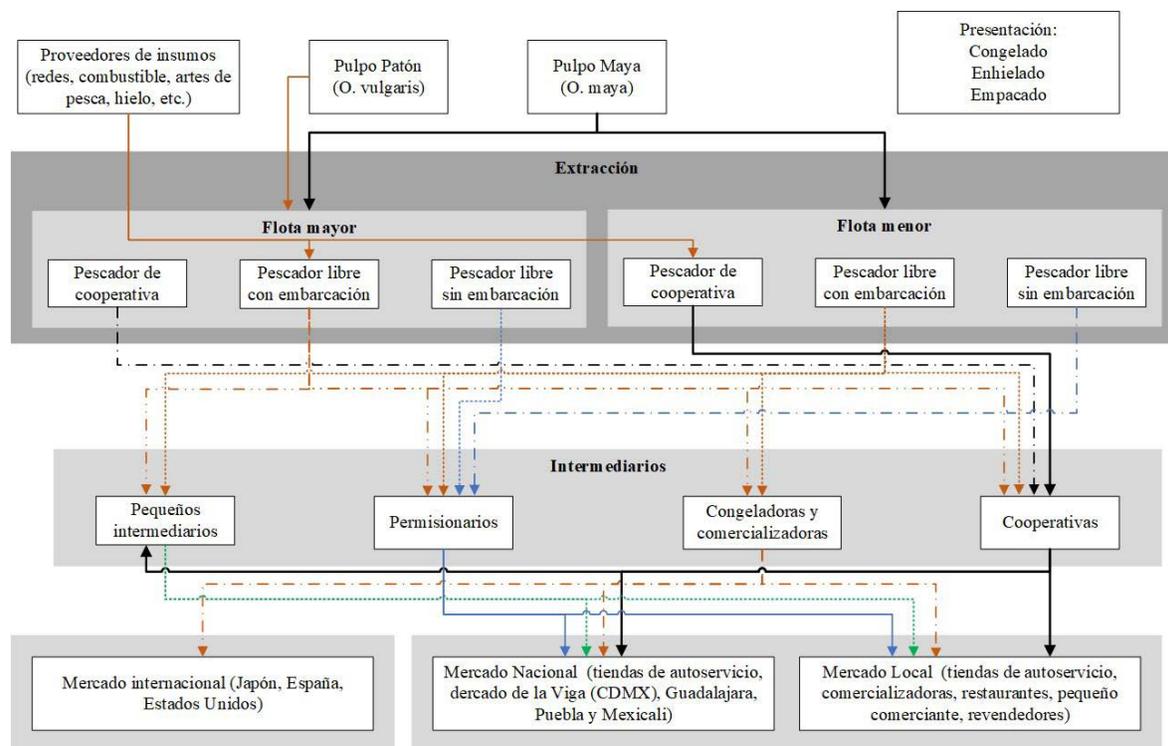


Figura 1. Diagrama general de la cadena de valor del pulpo en Yucatán

Fuente: obtenido de Comité Estatal del Sistema Producto Pulpo Yucatán A.C, 2009.

Nota: las diferentes líneas en la figura se utilizan para identificar los distintos canales de comercialización que ocurren desde la captura del pulpo hasta su llegada a los mercados.

El núcleo de la cadena de valor del pulpo maya es variable y depende del destino del producto, ya que cuando es comercializado en un mercado regional o nacional se involucran actividades de pesca-empacadora (acopiador)-transporte- distribui-



dor-consumidor final, sumándose el papel del bróker cuando el pulpo es exportado. Un bróker en la cadena de suministro es un intermediario que se encarga de facilitar el transporte de los productos, a este actor también se le conoce como agente logístico o corredor de carga (Paredes & Guzmán, 2021).

En este estrato el producto es transformado para facilitar y mejorar su distribución, es decir, se congela o se empaqueta para garantizar su calidad e inocuidad una vez que llega al consumidor final. En ésta última fase de la cadena, el producto llega a mercados locales (tiendas de autoservicio, comercializadoras, restaurantes y revendedores), mercados nacionales (tiendas de autoservicio, mercados de la viga situados en Guadalajara, Puebla y Mexicali) y mercados internacionales (Japón, España y Estados Unidos).

Una vez determinadas las fases que integran las actividades primarias de la cadena de valor propuesta por Ayala-Garay et al. (2016) se procede a describir las variables que permiten esquematizar la cadena de valor del pulpo maya, que se detallan a continuación:

- Actores y funciones: los actores centrales de la cadena de valor del pulpo maya incluyen a los pequeños pescadores, entre los cuales se encuentran familias dedicadas a esta actividad, el sector ribereño y otros pescadores rurales, que en conjunto representan el 70% del total del sector productivo pesquero (SADER, 2024B). También participan universidades, empresarios, la sociedad y diversas instituciones comprometidas con la preservación del medio ambiente y las especies de pulpo.

La complejidad de la cadena varía de según su alcance: a nivel regional y nacional, los canales de distribución suelen emplear transporte terrestre, mientras en el ámbito internacional predominan los medios marítimos y aéreos. Una problemática significativa en la cadena radica en el rol de los intermediarios. Cuando estos intervienen entre los pescadores y los empresarios industriales, su función tiende a ser sobrevalorada, ya que aprovechan las asimetrías de información y las coyunturas del sector para maximizar sus utilidades. Esto genera una dependencia económica y funcional que reduce los márgenes de ganancia de los pescadores y otros actores primarios.

Según Rojas González et al. (2024), la cadena de valor del pulpo maya adopta una forma de "reloj de arena", caracterizada por un amplio número de productores en la base, un número indeterminado de intermediarios, pocos operadores clave en el núcleo y una extensa variedad de consumidores finales. Esta cadena se organiza en cuatro eslabones principales: el nodo de la comunidad, el nodo peninsular, el nodo nacional y el nodo internacional. Los cuales están compuestos por los siguientes actores:



Tabla 2. Variables para determinar la cadena de valor

Tipo de eslabón	Actores y funciones
Nodo de la comunidad	<ul style="list-style-type: none">• Pescadores: algunos trabajan en cooperativas o permisionarios de la flota ribereña; por otro lado, existen pescadores independientes, quienes en ocasiones se encuentran organizados dentro de una cooperativa pesquera.• “Gaviotas” o “pachocheras”: son niños o mujeres que esperan la llegada de las embarcaciones para ayudar a limpiar o eviscerar a cambio de producto, ya sea para autoconsumo o para venta local.
Nodo peninsular	<ul style="list-style-type: none">• Intermediarios o pacotilleros: debido a que la mayoría trabaja informalmente, no se tienen datos sobre cuántos son. Se encargan de conseguir el producto directamente con los pescadores, recolectores y permisionarios, el cual posteriormente venden a plantas certificadas, hoteles o restaurantes, principalmente en el estado de Quintana Roo.• Compradores mayoritarios y dueños de plantas certificadas: lideran la comercialización y distribución del producto alrededor de la península de Yucatán, en el mercado nacional e internacional. Son actores clave debido a su patrimonio, ya que pueden poseer embarcaciones y permisos de pesca, por lo que tienen la capacidad de realizar acuerdos con otros actores de la cadena, lo que les permite comercializar a nivel peninsular, nacional e internacional.
Nodo nacional	<ul style="list-style-type: none">• Compañías nacionales o multinacionales: pueden distribuir en mercados o supermercados, debido a que tienen capacidad de almacenar, empacar y transportar. Realizan transacciones directamente a través de un intermediario con el cliente final o puede ser vendido a restaurantes o grandes mercados de mariscos.
Nodo internacional	<ul style="list-style-type: none">• Plantas certificadas: en este eslabón existen pocos actores, ya que se cuenta con 23 plantas certificadas en Yucatán y dos en Campeche, las cuales son actores clave, debido a que poseen los permisos para exportar a la Unión Europea y Asia. Realizan la mejora continua a través del Análisis de Riesgos y Control de Puntos Críticos para cumplir con los requerimientos internacionales.

Fuente: elaboración propia con base en Rojas González et al., 2024

- **Relaciones horizontales :** para el desarrollo de este tipo de relaciones la interacción y colaboración entre los actores de la cadena de valor del pulpo maya son fundamentales para garantizar su eficiencia y competitividad. No obstante, el desarrollo de estas relaciones enfrenta desafíos significativos, especialmente en el nodo comunitario, donde predominan acuerdos informales entre pescadores, cooperativas y pequeños intermediarios. Estas interacciones, orientadas principalmente al acopio y comercialización inicial, carecen de formalidad y estructuras que optimicen su funcionamiento.

En los niveles peninsular y nacional, las relaciones entre comercializadores y procesadores presentan mayor organización, particularmente en aspectos como la certificación y estandarización de productos. Sin embargo, persisten asimetrías de poder e información, favoreciendo a intermediarios en detrimento de los pescadores y actores locales, lo que acentúa la inequidad en la distribución de beneficios.

El modelo de la quintuple hélice de innovación se perfila como una solución estratégica para consolidar estas relaciones, integrando sectores clave dentro de un marco colaborativo que impulsa la innovación social y el desarrollo del capital social. Este enfoque busca robustecer la sostenibilidad del sector mediante plataformas tecnológicas y organizativas que promuevan una distribución más equitativa de los beneficios a lo largo de la cadena.



Pese a estos esfuerzos, persisten barreras como la informalidad de ciertos actores y la insuficiencia de infraestructura para mejorar actividades críticas. Estas limitaciones restringen la capacidad de los pescadores y pequeños actores para capturar valor agregado. Fortalecer las relaciones horizontales, especialmente mediante el apoyo técnico y financiero a las cooperativas, permitiría una mejor negociación de precios, una mayor trazabilidad y estándares más elevados de calidad.

La mejora de estas relaciones requiere acciones coordinadas para cerrar las brechas existentes. Esto incluye fomentar la transparencia en las transacciones, desarrollar las capacidades organizativas de los actores primarios y establecer esquemas colaborativos que faciliten una distribución más justa de los beneficios dentro de la cadena de valor.

- Información sobre el mercado: en la Tabla 3, se presentes posible observar que el sector del pulpo maya presenta debilidades en cuanto a la infraestructura existente para la transformación de productos de alto valor, la cual debe integrar procesos en los que la inocuidad tiene que prevalecer en todo momento, debido a las características perecederas del producto. Asimismo, se observan asimetrías en la distribución de los beneficios para los actores involucrados, ya que los márgenes de comercialización son muy bajos para los productores primarios y muy altos para otros participantes que obtienen ventajas de las estructuras de precios. Tal es el caso de embarcaciones de tamaño menor, las cuales al salir al mar invierten el 71% del ingreso bruto (con un margen del 29%). En el caso de las de mayor tamaño, se tiene que los gastos corresponden al 93% de este ingreso, por lo que su nivel de utilidad es aún menor, al ser únicamente del 7%. En los dos casos se tiene que los gastos más recurrentes son el combustible y la mano de obra (Rojas González et al., 2024).

Tabla 3. FODA de la cadena de valor del pulpo

Fortalezas	Oportunidades
La producción nacional de pulpo es la tercera más importante a nivel mundial, de acuerdo con el total de toneladas (más de 26 mil durante el 2023) (CONAPESCA, 2024). El pulpo presenta características como bajo contenido de calorías, grasas, azúcar y sodio, por lo que se considera como un alimento saludable. Su consumo per cápita en México en el año 2020 fue de 0.19 kg (SEMARNAT, 2020b) Este producto pesquero es uno de los más explotados comercialmente, debido a su gran demanda en la Unión Europea (UE), debido a su tamaño (entre 60 cm y un metro de largo) y la textura de su carne (Gullian-Klanian et al., 2016).	Los cambios en los estilos de vida de los consumidores han resultado en una mayor demanda de productos de mar frescos y procesados a nivel mundial. Estas demandas pueden conducir al desarrollo de técnicas que extiendan la vida útil de los mariscos. El crecimiento de los supermercados facilita la introducción de productos pesqueros con valor agregado. México posee un importante número de tratados de libre comercio que benefician su comercialización a nivel mundial.



El pulpo maya es una especie endémica en México, lo que ya es una ventaja comparativa importante en el mercado de productos del mar. Ya que se trata de un organismo con millones de años de desarrollo genético evolutivo dentro de la región de la Península de Yucatán, lo que le brinda cualidades únicas que son apreciadas desde la época precolombina (Rojas González et al., 2024).

Los productos elaborados a base de pulpo incluyen elementos de la gastronomía Yucateca, lo que se convierte en una diferenciación.

El pulpo maya se encuentra bien posicionado en el mercado nacional, con precios que oscilan entre US\$5.86 y US\$7.61 por kilogramo (SELINA WAMUCII, 2024). En el mercado europeo, particularmente en países como Italia, su precio varía entre 14.90 EUR/kg y 19.90 EUR/kg (EUMOFA, 2020).

El pulpo maya es emblemático en la península de Yucatán, por lo que al obtener la Indicación Geográfica del Pulpo Maya de la península de Yucatán se otorga identidad en el mercado internacional, incrementando su valor y promoviendo ventajas competitivas, como en el caso del Bacalao de Noruega (Rojas González et al., 2024).

Su huella de carbono es inferior al de otras pesquerías, debido a que las embarcaciones solo requieren de combustible para llegar a la zona de pesca, donde son operadas apoyándose del impulso del mar y el viento (Rojas González et al., 2024).

Se deben perfeccionar las formas de captura, distribución y venta del pulpo para cuidar la trazabilidad del producto.

Debilidades	Amenazas
<p>Los productos de mar requieren una mayor inocuidad al asociarse con la presencia de microorganismos patógenos, parásitos, virus y contaminantes industriales. Según Rojas González et al. (2024), se ha detectado en el sector un desabasto en el suministro de la carnada (cangrejo maxquil Libinia dubia y jaibas del género Callinectes) y el hielo. Insumos básicos para llevar a cabo la actividad.</p>	<p>El gran reto en la cadena de valor del pulpo es la distribución de los márgenes de comercialización, lo cual actualmente afecta los ingresos de algunos actores involucrados en la actividad. Se debe considerar un enfoque sustentable para garantizar la preservación del pulpo maya, al ser una especie endémica.</p>

Fuente: elaboración propia con base en Medina et al., 2019 y Rivera et al., 2019.

No obstante, el análisis elaborado refleja el gran potencial de crecimiento que presenta esta industria, ya que no solo se trata de una especie que goza de ventaja competitiva al ser endémica de México, sino que también presenta características importantes derivadas de su contenido de nutrientes, dada la presencia de ácidos grasos esenciales poliinsaturados en su contenido lipídico (grasas) (de 137 a 257 mg), dentro de los que se encuentran los de la serie omega-6, como el ácido araquidónico (39 a 86 mg) y el linoleico (2.1 a 2.8 mg). Además de los integrados en la serie omega 3, como son el ácido docosahexaenoico (dha) (47 a 82 mg) y el eicosapentanoico (epa) (31 a 50 mg) (Rojas González et al., 2024). Las cuales son altamente demandadas en los mercados nacionales e internacionales. Es importante considerar también que existen cambios en el estilo de vida de los consumidores, ya que según Guadarrama (2024) las tendencias de consumo actuales muestran claras preferencias hacia productos más saludables que brinden un bienestar integral, además de optar por la practicidad y la conveniencia de estos. Lo cual se muestra como una gran área de oportunidad para ofertar productos de alto valor derivados del pulpo maya que empaten con los nuevos requerimientos mundiales. Sin embargo, esta prospección de crecimiento debe integrar el desarrollo de estrategias que protejan las poblaciones de pulpo y sus ecosistemas, por lo que un enfoque sustentable es imperativo para garantizar el desarrollo del sector y su prevalencia en el largo plazo.

- Servicios críticos de apoyo : dentro del Plan Estratégico para el desarrollo de productos de alto valor agregado en el sector del pulpo (Medina et al., 2019),



impulsado por CIATEJ, se considera que la vinculación con el gobierno (municipal, estatal y federal) es fundamental para acelerar la conformación de infraestructura y el arribo de financiamientos a la producción. Asimismo, se requiere la diversificación de estas fuentes de financiamiento mediante la creación de redes entre las instituciones de crédito y las empresas pesqueras o los demás emprendedores de la cadena productiva, esto con la finalidad de facilitar el otorgamiento de bienes financieros.

- Servicios de asistencia técnica : el apoyo de la academia instaurada en universidades regionales y centros de investigación privados y públicos como CIATEJ son fundamentales para brindar acompañamiento a los productores y transformadores, ya que esto permite llevar a cabo con éxito aquellas iniciativas de mejora que se emprendan. Dentro de estos servicios se resalta también la importancia de los centros educativos y las universidades para brindar conocimientos y tecnologías que permitan transformar el pulpo maya en productos con alto valor agregado para el consumidor.
- Servicios de gestión de calidad: la frescura y calidad de los productos obtenidos del mar son percibidos de manera distinta por los consumidores, procesadores, agentes reguladores y los científicos involucrados. El mantenimiento de su calidad es más difícil en comparación a otros alimentos, debido a que está influenciada por factores intrínsecos y extrínsecos, como son: la especie, el tamaño, el sexo, la composición, el desove, la presencia de parásitos, toxinas, la contaminación y las condiciones generales de cultivo. Es por esto que la producción de mariscos no puede controlarse directamente o predecirse con precisión. Al respecto, los gobiernos de Yucatán, Campeche y Quintana Roo, a través del Instituto de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentables, coordinaron la iniciativa para obtener la Declaratoria de Protección de la Indicación Geográfica del Pulpo Maya de la Península de Yucatán, en conformidad con la fracción III del artículo 273 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial (dof, 01/07/2020). Lo que permite clasificarlo de acuerdo a su color, tamaño, sabor y características, atributos que lo diferencian y lo distinguen en términos propios (Rojas González et al., 2024; Medina et al., 2019; Rivera et al., 2016).
- Inteligencia comercial: las tendencias actuales en cuanto a la tecnología de los productos pesqueros se basan en satisfacer las demandas cambiantes de los consumidores. En específico, los clientes prefieren el producto de dos maneras principales, la primera es en fresco y congelado, es decir, que se encuentran empaquetados de tal manera que están listos para cocinarse; la segunda forma son los mariscos procesados, como es el caso del salmón



ahumado y los mejillones . Dentro de los mercados regionales, nacionales e internacionales existe una amplia preferencia por los productos en fresco; no obstante, la tendencia de consumo requiere el desarrollo de innovaciones que extiendan la vida útil y agreguen conveniencia a los mariscos. Asimismo, se requiere integrar el tema de la inocuidad en diversas fases de la cadena de valor. En la fase de captura se cuida la inocuidad de acuerdo a la calidad del agua, ya que en ocasiones se utiliza el agua de mar es utilizada para lavar las capturas o los utensilios. En el caso de sitios de desembarque que posean toma de agua, ésta es evaluada cada seis meses mediante análisis fisicoquímicos realizados por la cofepris, con la finalidad de que cumpla con los parámetros de la nom-127-ssa-1994. Asimismo, los permisionarios y/o concesionarios de pesca comercial de pulpo deben poseer embarcaciones que cuenten con la Certificación de Inocuidad por el Cumplimiento de las Buenas Prácticas de Manejo a Bordo de Embarcaciones Menores. En la fase de la comercialización, para que las plantas de pulpo puedan exportar, se requiere una certificación otorgada por la Secretaría de Salud, dentro de la cual se cumple la Norma Oficial Mexicana nom-128-ssa-1994 “Bienes y servicios. Que establece la aplicación de un sistema de Análisis de Riesgos y Control de Puntos Críticos en la planta industrial procesadora de productos de la pesca” (dof, 12/06/2016). En lo que respecta a las normas internacionales, en México se ha establecido un sistema basado en el Análisis de Riesgos y Control de Puntos Críticos en los procesos realizados por las plantas industriales de productos de pesca, además se han introducido sistemas de calidad bajo las Normas iso 9000 o la Gestión de la Calidad Total. Del mismo modo, la Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) ofrece tres certificaciones de acuerdo al país de destino: Certificado de Libre Venta, Certificado de Análisis de Producto y Certificado de Conformidad de Buenas Prácticas Sanitarias (Rojas González et al., 2024).

Algunas formas de valor agregado que ha desarrollado CIATEJ se resumen en el documento denominado “Pulpo maya: productos de alto valor agregado”, las cuales son: escabeche de habanero listo para comerse, pulpo en salsa pibil, pulpo en relleno negro, brazos de pulpo en aceite, salmuera de pulpo maya, chicharrón de pulpo maya, nuggets de pulpo pollo, nuggets de pulpo maya con proteínas vegetales, salchichas de pulpo maya, jamón de pulpo maya, surimi de pulpo maya, snacks de pulpo maya con harinas vegetales, paté de pulpo, sopa con pulpo, aceite de pulpo y colágeno de subproductos de pulpo (CIATEJ, 2024).



- Logística y almacenamiento: después de las capturas y el evisceramiento de los pulpos, éste se entrega fresco a las cooperativas, a las bodegas o a los intermediarios. En este contexto, el producto congelado puede estar hasta cinco días en las bodegas, donde después es entregado al siguiente comprador, que también pueden ser los intermediarios, los minoristas o comerciales principales que posean plantas certificadas para la exportación. Sin embargo, en este último caso, el producto eviscerado se entrega el mismo día para garantizar su inocuidad (Rojas González et al., 2024). En general, dentro de la tendencia mundial, los productores de marisco se encuentran integrando equipos de refrigeración que garanticen la calidad y el sabor de sus productos, evitando que sean afectados por cambios climáticos y fluctuaciones de temperatura. Este proceso se realiza en más del 95% de la industria del pulpo y requiere que la infraestructura de congelado utilizada sea lo suficientemente eficiente para preservar las cualidades del producto. Una segunda manera de distribuir el pulpo es batido, es decir, se hidrata con una salmuera por medio de agitación, con la finalidad de que adquiera una consistencia más firme y de mejor presentación para el consumidor, ya que obtiene una característica forma de flor. Por último, se tiene el pulpo listo para comer, donde este es cocinado bajo temperaturas óptimas que lo hacen ideal para un consumo más conveniente; no obstante, es un proceso poco aplicado en la industria actualmente. De acuerdo a la información recopilada en diferentes estudios de la cadena de valor del pulpo maya (Medina et al., 2019; Rivera et al., 2019; Rivera et al., 2019B), se observan diversas problemáticas, áreas de oportunidad y eslabones clave para añadir valor al producto. Asimismo, se puede inferir que el valor del pulpo maya aumenta cuando se preserva su calidad y atributos durante su proceso de almacenamiento y comercialización, ya que se trata de un producto delicado que depende de estrictas condiciones de temperatura para preservarse. Del mismo modo existen otras características que deben desarrollarse a nivel industria y producto para incrementar su valor en el mercado e impactar positivamente en las utilidades de los actores involucrados. Dentro de la Tabla 4 se resumen aquellos eslabones relevantes para la creación de valor, así como algunas estrategias que pueden mejorar el desempeño de la actividad.



Tabla 4. Estrategias para añadir valor en la cadena del pulpo maya

Extracción	
Situación actual	Estrategias que aumentan el valor agregado
<p>Existe un desabasto en el suministro de la carnada y el hielo. Debido a que en algunos municipios el aprovisionamiento de la carnada es local, lo cual resulta insuficiente. Además de que no se tiene garantía ni vigilancia de la calidad y frescura del recurso.</p> <p>En el caso del hielo, se tiene que en todos los puertos pesqueros se cuenta con el servicio de expendio, sin embargo, no en todos se tiene una fábrica que lo produzca, por lo que se obtiene de localidades más alejadas. Este desabasto origina que el sector sea vulnerable, lo que pone en riesgo la garantía de la cadena en frío, la operatividad del sistema y el volumen para el manejo de la captura diaria.</p>	<p>Es necesario procurar el correcto abastecimiento de los insumos para la extracción, con el fin de no comprometer la calidad del producto al pasar a la etapa del procesamiento. Las empresas dedicadas a procesar el pulpo requieren que éste llegue eviscerado, enhielado (escarchado con bastante hielo) y que tenga buen olor y color. Es por esto que es necesario un constante abastecimiento de hielo, sobre todo en las regiones más alejadas.</p> <p>Se debe dar un mayor énfasis a la sustentabilidad, ya que algunos empresarios sugieren que se deben actualizar los estudios sobre los efectos del cambio climático en las poblaciones de pulpo. Aunado a una mayor inspección y vigilancia de la pesca furtiva para respetar los tiempos de veda, con el fin de preservar y mejorar la disponibilidad de la especie en el largo plazo.</p>
Procesamiento	
Situación actual	Estrategias que aumentan el valor agregado
<p>En este eslabón, el papel de los centros de acopio es relevante para la creación de valor. Estos establecimientos pertenecen a los permisionarios de cooperativas, particulares o empresas, o bien, a intermediarios minoristas o mayoristas. Se localizan en la parte trasera de viviendas donde se preserva el producto en congeladores o existen casos donde se cuenta con mayor infraestructura.</p> <p>No obstante, existe poca información sobre el número de centros de acopio, además de que su gran número y diversidad dificultan el seguimiento de las condiciones sanitarias del producto. Por lo que es necesario aplicar las buenas prácticas presentadas en el libro “Manual de Buenas Prácticas de Manufactura para la Transformación del Pulpo Maya (Octopus Maya) de la Península de Yucatán” conocimientos sobre el manejo adecuado del producto y su inocuidad (Pacheco & Cuevas, 2023).</p>	<p>Se requieren inversiones en estructuras de congelamiento que sometan el producto a menos veinte grados bajo cero, con lo que se logre un congelamiento y desinfección adecuada del pulpo.</p> <p>Además, es necesario que los locales dedicados a esta actividad estén cubiertos con superficies fáciles de limpiar, que cuenten con drenaje y suministro suficiente de agua potable, bastante iluminación y medidas necesarias para evitar la entrada de insectos o roedores.</p> <p>Asimismo, para aumentar su valor en esta etapa, no solo se deben cuidar las buenas prácticas de sanidad, sino también procurar la homogeneidad del producto (organizarlo por tallas) para pasar al siguiente eslabón: la comercialización.</p>
Comercialización	
Situación actual	Estrategias que aumentan el valor agregado
<p>Se percibe una falta de infraestructura para llegar al cliente final, por lo que se debe articular un ecosistema de la cadena de valor que mejore las condiciones de presentación del producto y su uso para el cliente final.</p>	<p>Se precisa la integración de tecnología de empaque y embalaje al producto en fresco y congelado. A nivel nacional e internacional se han desarrollado diversos productos derivados del pulpo, los cuales han evolucionado y pueden otorgar una coyuntura para agregar valor al pulpo maya. Algunos de estos productos son: capaccio de pulpo, tentáculos listos para comer, ensaladas con pulpo o diversas preparaciones gourmet.</p> <p>En este sentido, el etiquetado es uno de los elementos relevantes del producto, ya que proporciona al consumidor información nutrimental, de ingredientes, certificaciones, sustentabilidad, instrucciones de uso, fecha de caducidad e información sobre la compañía productora.</p> <p>Según el estudio realizado por CIATEJ (Rivera et al., 2019B), los atributos que debe considerar el producto para ofrecer valor y satisfacer las demandas del consumidor son: la frescura, el precio, la variedad, su practicidad y la disponibilidad en el punto de venta.</p> <p>El desarrollo de negocios que transformen la materia prima en productos de alto valor también representa mayores oportunidades de empleo para los actores involucrados en las actividades de la cadena de valor.</p>

Fuente: elaboración propia con base en Rivera et al., 2019B



Conclusiones

El análisis de la cadena de valor del pulpo maya refleja tanto las ventajas competitivas inherentes a esta especie como los retos estructurales que enfrentan los actores involucrados. Como recurso endémico de la península de Yucatán, el pulpo maya goza de una diferenciación importante en mercados nacionales e internacionales debido a su calidad y atributos únicos. Sin embargo, el modelo actual de comercialización, basado mayoritariamente en la exportación de producto congelado sin valor agregado, restringe las oportunidades económicas y limita la competitividad del sector.

Es esencial promover el desarrollo de la cadena de valor para maximizar el potencial económico y social del pulpo maya. Esto implica abordar cinco áreas estratégicas: 1) Infraestructura y transformación con valor agregado: el desarrollo de infraestructura adecuada para el procesamiento y almacenamiento es crítico. Es necesario fomentar inversiones en plantas certificadas, tecnologías de empaque avanzado y sistemas de trazabilidad que permitan la diversificación de productos con mayor valor agregado, como conservas, tentáculos precocinados, productos gourmet o preparados listos para consumo. Esto incrementará la participación de los actores primarios en los márgenes de ganancia y responderá a las crecientes demandas del mercado global.

2) Fortalecimiento de las relaciones horizontales: las asimetrías de poder e información entre los actores de la cadena representan un desafío que debe abordarse mediante la promoción de esquemas de colaboración más equitativos. La creación de plataformas digitales para la negociación, el acceso a información de precios y la logística puede empoderar a los pescadores y pequeños productores. 3) Innovación y colaboración multisectorial: el modelo de la quintuple hélice debe implementarse de manera efectiva para integrar al gobierno, la academia, el sector privado, la sociedad civil y los actores comunitarios en un esquema de innovación social. Esta integración facilitará el desarrollo de nuevas tecnologías, la capacitación técnica, la certificación internacional y el acceso a financiamiento para proyectos que potencien el valor agregado del pulpo maya.

4) Sostenibilidad y gestión de recursos: el futuro de la industria depende de prácticas de pesca responsables que respeten los periodos de veda y aseguren la regeneración de las poblaciones de pulpo. La implementación de estudios continuos sobre los impactos del cambio climático y la pesca furtiva es clave para proteger este recurso. El desarrollo de políticas públicas que incentiven la sostenibilidad y penalicen la sobreexplotación es fundamental.

Finalmente, 5) El aprovechamiento de tendencias de mercado: los cambios en los patrones de consumo global hacia alimentos saludables y convenientes representan una oportunidad para posicionar al pulpo maya en nichos de mercado premium.



Aprovechar estas tendencias requiere estrategias de mercadotecnia específicas, el desarrollo de productos innovadores y una comunicación clara sobre las ventajas del pulpo maya, incluida su sustentabilidad y origen endémico.

Por lo que, la consolidación de la cadena de valor del pulpo maya requiere un enfoque integral y multidimensional que contemple la mejora de infraestructura, la equidad en las relaciones entre actores, la promoción de innovación, el acceso a financiamiento, la sostenibilidad ambiental y aprovechamiento de las tendencias del mercado. Si estas estrategias se implementan de manera coordinada, el sector no solo podrá incrementar su competitividad y utilidades, sino también garantizar su viabilidad a largo plazo y su reconocimiento como un producto emblemático de alta calidad en los mercados internacionales.

Conflicto de interés

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Referencias

- Ayala-Garay, A. V, Espitia-Rangel, E., Rivas-Valencia, P., Martínez-Trejo, G., & Almaguer-Vargas, G. (2016). Análisis de la cadena del valor de amaranto en México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 8(3), 87–104. <https://doi.org/https://doi.org/10.22231/asyd.v13i1.280>
- Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. (2024). *Pulpo Maya. Productos con alto valor agregado*. CONAHCYT.
- Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. (28 de enero de 2024). *Está México entre los líderes en producción de pulpo a nivel mundial según la FAO*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conapesca/articulos/esta-mexico-entre-los-lideres-en-produccion-de-pulpo-a-nivel-mundial-segun-la-fao?idiom=es>
- Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. (2023). *Anuario estadístico de acuacultura y pesca 2023*. CONAPESCA.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo. (2005). *Medición de la pobreza*. Recuperado de <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Modulo-de-Condiciones-Socioeconomicas.aspx>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *GLOBEFISH HIGHLIGHTS A QUARTERLY UPDATE ON WORLD SEAFOOD MARKETS*. FAO. Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/items/72b63018-ee9f-4532-bcdf-d5a273d4e67a>
- Guadarrama, I. (22 de agosto de 2024). Cómo las Preferencias del Consumidor están Cambiando en el 2024. *Neolabs*. <https://www.neolabs.com.mx/post/c%C3%B3mo-las-preferencias-del-consumidor-est%C3%A1n-cambiando-en-el-2024>



- Gullian-Klanian, M., José, S. S.-M., Terrats-Preciat, M., Delgadillo-Díaz, M., & Aranda, J. (2016). Quality indicators and shelf life of red octopus (*Octopus maya*) in chilling storage. *Food Science and Technology*, 304-312. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.0077>
- Instituto Mexicano de Investigación En Pesca y Acuicultura Sustentable. (2019). *Pulpo del Golfo de México y Mar Caribe*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/imipas/es/articulos/pulpo-del-golfo-de-mexico-y-mar-caribe-211423?idiom=es>
- Rivera Ramírez, J., Contreras Medina, D., Guevara León, M., Vázquez Elorza, A., Urdiales Kalinchuk, A., Olvera Vargas, L., Pardo Nuñez, J., Rodríguez Peralta, C., Romero Romero, Y., & García Pérez, M. (2019). *Inteligencia de Mercado: Plataforma tecnológica pulpo maya*. CIATEJ-PROTEAA-Intor.
- Medina, D. I., Elorza, A. V., Romero, Y. R., Nuñez, J. P., & Guevara, M. (2019). *Plan Estratégico: plataforma tecnológica pulpo maya para el desarrollo de productos de alto valor agregado*. CIATEJ.
- La dependencia de las materias primas: 5 cosas que necesitas saber. (2023). *ONU Comercio y Desarrollo*. Recuperado de <https://unctad.org/es/news/la-dependencia-de-las-materias-primas-5-cosas-que-necesitas-saber>
- Observatorio Europeo del Mercado de los Productos de la Pesca y de la Acuicultura. (2020). *Estructura de los precios en la EU*. EUMOFA. <https://eumofa.eu/sources-of-data>
- Pacheco Lopez, N. A., & Cuevas Bernardino, J. C. (2023). *Manual de Buenas Prácticas de Manufactura para la Transformación del Pulpo Maya (Octopus Maya) de la Península de Yucatán*. CIATEJ.
- Paredes Robalino, S. O., & Guzmán Marcó, A. F. (2021). *Propuesta de mejora en la cadena de suministro de la producción de palta bass utilizando SC. Agility en Carac, Huaral* [tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio institucional UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/657969>
- Porter M. (1998). *The Competitive Advantage of Nations (Vol. 1)*. The Free Press.
- Porter, M. (2001). The value chain and competitive advantage. En D. Barnes, *Understanding Business: processes* (pp. 50-66). Routledge.
- Quintero, J., & Sánchez, J. (2006). La cadena de valor: Una herramienta del pensamiento estratégico. *Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales*, 8(3), 377-389. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6436476>
- Rivera, J., Medina, D., Guevara, M., Vázquez, A., Urdiales, A., Olvera, L., . . . García, M. (2019). *Inteligencia de mercado. Plataforma tecnológica pulpo maya*. CIATEJ.
- Rivera, J., Contreras, D., Guevara, M., Ariel, V., Alena, U., Olvera, L., . . . García, L. (2019b). *Diagnóstico competitivo: plataforma tecnológica pulpo maya*. CIATEJ.



- Rojas González, R. I., Santos Valencia, J. d., Pensamiento Villarauz, S., Poot Salazar, A. V., Puerto Mocochoa, M. J., & Arenas Fuentes, P. R. (2024). *Indicación Geográfica del Pulpo Maya de la Península de Yucatán*. IMIPAS.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024a). *Iniciativa Sustentable del Pulpo Maya: Fortaleciendo la pesquería con responsabilidad y compromiso*. Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/iniciativa-sustentable-del-pulpo-maya-fortaleciendo-la-pesqueria-con-responsabilidad-y-compromiso>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024b). Programa Nacional de Pesca y Acuicultura (2020-2024). Gobierno de México. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/616554/PROGRAMA_Nacional_de_Pesca_y_Acuicultura_2020-2024baja.pdf
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). La importancia de la pesca en México y en la alimentación. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-importancia-de-la-pesca-en-mexico-y-en-la-alimentacion>.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesc y Alimentación. (2009). *Programa maestro de pulpo en el estado de Yucatán*. Recuperado de: https://cadenasproductivas.conapesca.gob.mx/pdf_documentos/comites/csp/Programa_Maestro_Estatal_Pulpo_Yucatan.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Océanos y mares de México*. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/oceanos-y-mares-de-mexico#:~:text=Dos%20regiones%20marinas%20custodian%20tierra,M%C3%A9xico%20y%20el%20Mar%20Caribe>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020b). *Consumo nacional aparente por destino y especie*. Gobierno de México. Recuperado de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2021/archivos/02_pesca/d2_pesca03_02.pdf.
- SELINA WAMUCII. (s.f.). *Precios del pulpo en México*. Consultado el 15 de agosto de 2024 de <https://www.selinawamucii.com/es/perspectivas/precios/mexico/pulpo/>.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquería. (2018). *Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SLACON)*. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap>.

Geotecnologías para la caracterización de la caña de azúcar en el área de abastecimiento del Ingenio Tala, Jalisco

Luis Alberto Olvera-Vargas¹, Noé Aguilar-Rivera² y Yair Romero-Romero^{1*}

¹Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) comisionado al Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ). Av. Normalistas 800 Colinas de La Normal, Guadalajara, Jalisco, México. C.P. 44270.

²Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana. Km. 1 Carretera Peñuela Amatlán de los Reyes S/N., Córdoba, Veracruz, México. C.P. 94945

*Autor de correspondencia: yromero@ciatej.mx

Palabras clave:

agroquímicos,
espectroradiometría, firmas
espectrales, VANTs.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 221-234.
ISSN: 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14720511>

Recibido: 20 de septiembre 2024
Revisado: 04 de diciembre 2024
Aceptado: 11 de diciembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Resumen

La agricultura es la actividad económica más relevante para el ser humano y se han creado avances tecnológicos sustentables y menos costosos con el afán de asegurar y mejorar esta práctica. En este sentido, en este manuscrito se describen los procesos realizados para la caracterización territorial de la caña de azúcar, específicamente en las actividades que se relacionan en el uso y manejo de productos agrícolas, así como las acciones agroecológicas que se llevan a cabo en el área de abastecimiento del Ingenio Tala, Jalisco, a través del uso de tecnologías geográficas, como la espectroradiometría de campo y la fotogrametría (combinación de vehículos aéreos no tripulados [VANTs] y sensores multiespectrales). Estas tecnologías son usadas en México en los procesos de agricultura de precisión, debido a que son eficaces, no invasivas, no destructivas y accesible de forma operativa.

Introducción

La caña, como materia prima, se cultiva en 107 países y la producción anual mundial supera los 2 000 millones de toneladas obtenidas de más de 27 millones de hectáreas (FAOSTAT, 2022). La agroindustria azucarera es de gran importancia para los países que la producen y aún más para quien la consumen, debido a que es un producto básico en la alimentación humana. Contribuye en la generación de empleos directos e indirectos, especialmente en comunidades rurales, contribuye en las economías de los países



productores por la producción y exportación, así como el impulso en la competencia comercial entre países exportadores e importadores (Aguilar et al., 2016).

En México, el cultivo de la caña de azúcar también es considerada una actividad empresarial, actualmente ocupa el sexto lugar en producción mundial, con más de 55 millones de toneladas al año. En 2023, la producción de caña de azúcar se realizó en 265 municipios de 16 estados (Figura 1) y la vendieron a 49 ingenios azucareros, destilerías autónoma y trapiches piloncilleros del país (SIAP, 2023).

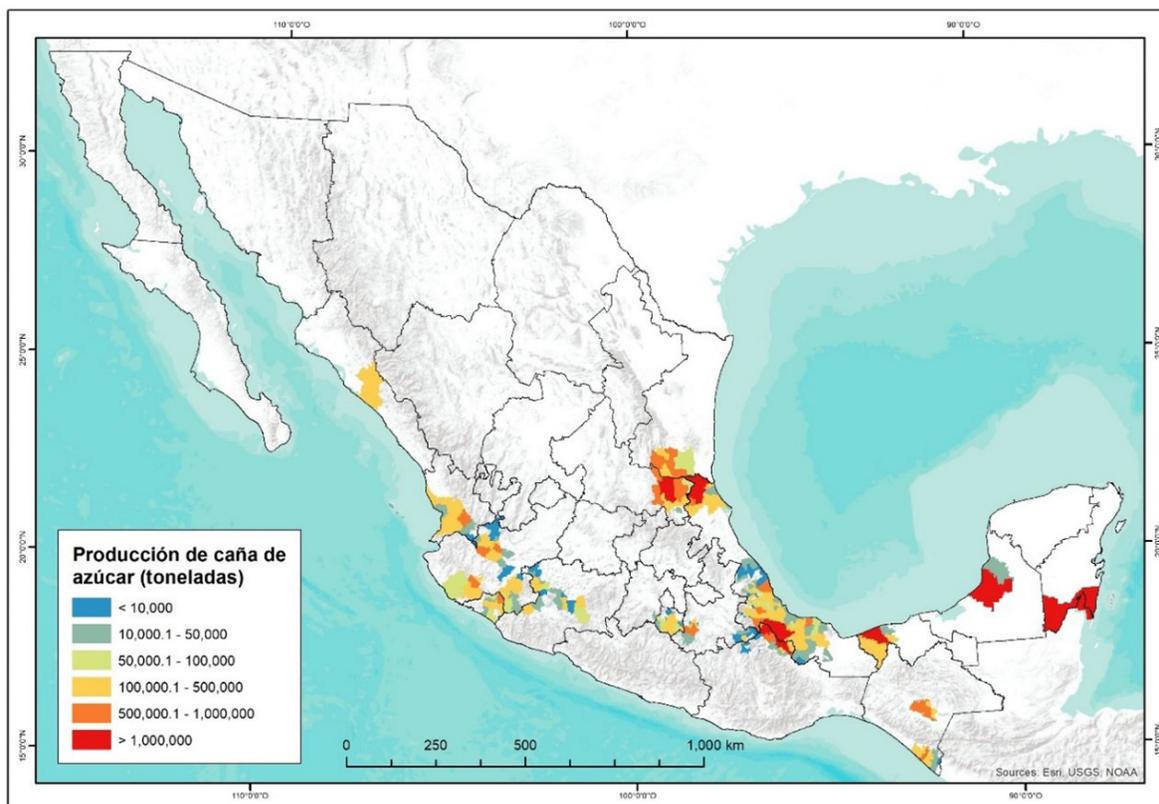


Figura 1. Municipios productores de caña de azúcar
Fuente: SIAP, 2023

La caña de azúcar se cultiva en 854 301 hectáreas, 43.9% corresponden a riego y 56.1 % son de temporal. Las principales entidades federativas que producen caña de azúcar son Veracruz (38.1%), Jalisco (12.9%), San Luis Potosí (9.3%), Oaxaca (5.9%), Chiapas (5.2%), Tamaulipas (4.1%), Tabasco (3.7%) y Morelos (3.4%); el 17.4% restante se distribuye entre los otros estados productores. Para la zafra 2022-2023 se obtuvo 52 000 millones de pesos por la producción, con rendimientos promedio de 69.8 t/ha (SIAP, 2023). La importancia de la caña de azúcar en México radica en que 400 000 familias dependen de su producción directamente y cerca de 2.5 millones de personas dependen indirectamente, entre los que sobresalen más de 170 000 trabajadores de campo y cortadores de caña, 23 000 obreros sindicalizados,



16 000 personas en labores administrativas y 30 000 transportistas, entre otros. Se calcula que la agroindustria azucarera participa con el 0.5% del Producto Interno Bruto de México (SIAP, 2023; Aguilar, 2012).

El campo mexicano requiere tecnificación, que incorpore métodos sustentables y rápidos, además de que considere a productores y actores clave, con una participación social activa, específicamente en lo relación a temas como los problemas fitosanitarios y su posible control, tipo de manejo agronómico, así como insumos utilizados para mejorar rendimientos productivos (Aguilar et al., 2016). Es por esto, que en los últimos años se han utilizado un conjunto de técnicas, herramientas y procedimientos en el ámbito geográfico y de información territorial para el manejo productivo de cultivos relevantes, que involucre procesos más sustentables y de bajo costo (Awad, 2018). Las tecnologías geoespaciales o geotecnologías en los estudios de agricultura de precisión han permitido ampliar el monitoreo agrícola, apoyan la planificación territorial rural de una manera sostenible, no está limitada a cultivos o regiones agrícolas y la información generada es dinámica y multitemporal, que permite mapear procesos de expansión, retracción, conversión y diversificación agrícola (Bolfé, 2019). Mustashkina et al. (2021) mencionan que las tecnologías geográficas no solo ayudan al seguimiento agrícola, sino que han escalado a procesos de gestión territorial, tanto para programar las épocas y etapas de cosecha, como para el uso de recursos y personas que están involucrados en estas actividades. Las geotecnologías incluyen el uso de sistema de geoposicionamiento global (GPS), los sistemas de información geográfica (SIG), fotogrametría y la teledetección que, al ser usados en la gestión agrícola, evolucionan a procesos de agricultura de precisión (Filippini et al., 2017; Reddy, 2018).

Otras herramientas geotecnológicas han sido los sensores de campo, que son equipos o aparatos portátiles que ayudan a obtener información espectral a nivel parcela, que muestran la radiación en bandas espectrales superpuestas, que cubren regiones del visible e infrarrojo cercano (NIR) y proporcionan detalladamente el estado fisiológico y bioquímico de la vegetación, además de que pueden combinarse con bandas espectrales de otros sensores remotos (Pacheco y Martín, 2015). Uno de estos sensores de campo, son los espectralradiómetros de campo, que muestran la respuesta espectral específica a través de la absorción de sus bandas y sirve para diferenciar unos objetos de otros, ya que cada superficie refleja la cantidad de energía según sea utilizada (Ni et al., 2018). Para estudios de vegetación y, más específicamente para caña de azúcar, Rao et al., (2007) utilizaron espectralradiómetros para crear bibliotecas espectrales que caracterizaban las etapas fenológicas de la caña de azúcar y las diferenciaban de otros cultivos, además de escalar la información espectral a imágenes de satélite y de esa forma, territorializar la distribución de los cultivos.



Las geotecnologías ofrece ventajas para abordar y entender los nuevos desafíos que ocurren en el territorio, con un análisis integral considerando interacciones sociales dinámicas en varias escalas temporales y espaciales. En México, aún falta incluir estudios con perspectiva geotecnológica, sobre todo en lo relacionado a gestión territorial agrícola, en donde se identifique espacialmente el manejo agrícola (sea químico o agroecológico) que ayude a crear programas de planeación sustentable, así como gestionar el uso de productos agrícolas, en beneficio de los productores, sus familias y el medio ambiente.

Zona de estudio

El área de estudios correspondió al área de abastecimiento del Ingenio Tala, entre las coordenadas extremas $20^{\circ}30'15''$ N, $103^{\circ}31'35''$ W y $20^{\circ}55'35''$ N, $104^{\circ}12'33''$ W, ubicado en el municipio del mismo nombre y que se encuentra a 30 km al occidente de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Este ingenio pertenece al Grupo Azucarero México, S. A de C. V. con capacidad de procesar 16 000 toneladas de caña por día y producir 1 600 toneladas de azúcar cada 24 horas. El número de agricultores registrados que abastecen al ingenio son 7 517 (4 914 ejidatarios y 2 603 pequeños propietarios) de 138 ejidos productores y 1 196 cortadores de caña que participaron en la zafra 2022-2023 (MAM, 2024). El total de superficie de zafra se obtuvo de 25 525.21 hectáreas del área de abastecimiento, con 68.4% (17,461.9 ha) de riesgo y 31.6% (8,063.2 ha) de temporal (Figura 2).

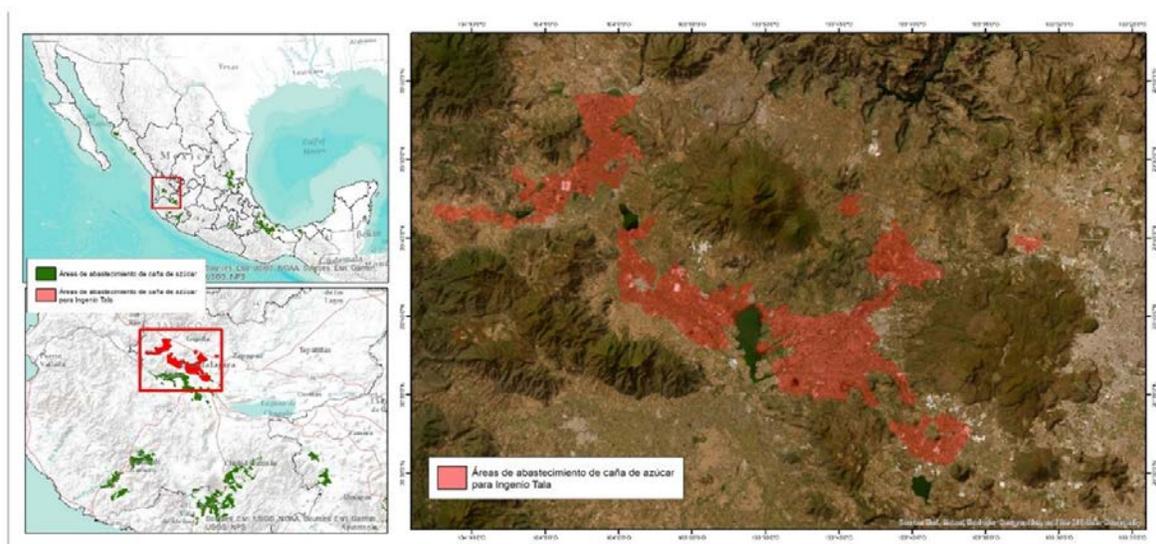


Figura 2. Áreas de abastecimiento de caña de azúcar para el Ingenio Tala
Fuente: MAM, 2024

En la zona de abastecimiento se prepara la tierra a través del chapón, junta y quema, subsuelo, barbecho, rastra, nivelación, trazo de surco y surcado. Las plagas



reportadas son barrenador del tallo y Tuza. Las condiciones ambientales que presenta son altitud 1 300 m.s.n.m. clima semi-cálido y semi-seco, precipitación pluvial cercana a 900 mm al año, con temperatura media anual de 20.5 a 22 °C, temperatura máxima media de 30 °C y temperatura mínima media de 10.8 °C. Se registran predominantemente nueve variedades de caña (Tabla 1).

Tabla 1. Variedades de caña de azúcar registradas para el abastecimiento del ingenio Tala, Jalisco

Variedad de caña de azúcar	Superficie (ha)	Porcentaje
CP 72-2086	7,242	28.4
Mex 57-473	4,973	19.5
Mex 69-749	3,597	14.1
Mex 69-290	2,439	9.6
Mex 79-431	1,828	7.2
RD 7511	1,085	4.3
COLMEX 95-27	876	3.4
ITV 92-1424	814	3.2
LCP 85-384	553	2.2
Otras	2,109	8.3

Fuente: MAM, 2024

Materiales y Métodos

Se realizó un taller participativo el 28 de septiembre de 2024 en la Casa de la Comunidad Agraria, ubicado en la cabecera municipal de Tala, en donde se reunió a 17 productores de caña de azúcar de la zona (Figura 3). En dicho taller se realizó una presentación sobre los objetivos y alcances del proyecto, haciendo una invitación a los productores a permitir monitorear su parcela durante la duración del proyecto. También, con la técnica de árbol de problemas, se identificó los principales problemas que los productores para producir y vender su caña de azúcar. Paralelamente se entabló comunicación con personal de ingenio Tala, perteneciente al Grupo Azucarero México, S. A. de C. V., a través de la Unión Local de Productores de Caña de Azúcar A.C. (ULPCA) y la Unión Nacional de Cañeros (UNC-CNPR) y se tuvo asistencia con personal del programa Producción para el Bienestar de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). También se visitó el 27 de octubre de 2024 la biofábrica ECA de Ahuisculco, Tala, además de realizarse reuniones personales con algunos técnicos de campo y productores de la zona. En total, para toda el área de abastecimiento del Ingenio Tala, se monitoreo 10 parcelas con diferentes extensiones.

En cada una de las parcelas se realizaron mediciones con un espectroradiómetro CROPSCAN MR modelo MSR5 multiespectral que abarca una longitud de onda que va de 450 a 950 nanómetros (nm) y una resolución de cinco bandas. Las me-



diciones se hicieron al azar dentro de la parcela, con ayuda de un tubo extensivo, se colocaba el sensor CROPSCAN en la parte superior y a una altura no mayor a 1 metros en el cenit de las plantas (Figura 3). Por parcela se tomaron 10 puntos, con tres repeticiones cada uno, esto con el fin de tener el promedio de cada punto medido (CROPSCAN, 1994). Las mediciones se hicieron entre 10:00 a.m. y 4:00 p.m. para captar la incidencia del sol en un ángulo de 45 a 135° y sin nubosidad. Se registraron las condiciones ambientales y edafocológicas de los sitios muestreados, con el fin de asociar y/o ayudar a explicar las respuestas espectrales de cada sitio. Los registros consistieron en la observación directa en campo.

Paralelamente, se realizó un levantamiento aerofotogramétrico con un Vehículo Aéreo No tripulado (Dron) DJI Mavic 2 Zoom al cual se le montó un sensor infrarrojo de la marca MAPIR Survey 3W RGN, que captura las bandas Roja (RED – 660 nm), Verde (Green -550 nm) e infrarroja (NIR – 850 nm). Los vuelos se realizaron a una altura de 70 metros sobre el nivel de suelo, a una velocidad de 8 metros/segundo para tener sobreposición en imágenes del 60 % en la horizontal y 40 % en la vertical (Figura 3). Las imágenes capturadas se descargaron en un servidor, se organizaron y eliminaron fotos con errores de captura, para posteriormente procesarlas en el software AgisSoft metashape. En dicho programa se cargaron las fotos para la realización de nubes de puntos, pasando por una malla y finalizar en la generación de un ortomosaico rectificado con los valores de geoposicionamiento (GPS) de cada imagen (el sensor MAPIR tiene adaptado un GPS). Cada ortomosaicos (correspondiente a cada parcela), al estar compuesto por bandas con longitud de onda en infrarrojo (NIR), rojo (RED) y verde (GREEN), se procedió a realizar un Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) el cual consistió en la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$



Figura 3. Actividades realizadas en el área de estudio



Resultados y Discusión

En el estado de Jalisco existen seis ingenios azucareros distribuido en casi todo el estado, lo que indica que la caña de azúcar se produce en diferentes agrosistemas. Estos ingenios son de los más tecnificados del país, produciendo más caña molida en toneladas que la mayoría de los ingenios de otros estados (Hernández, 2014). Los rendimientos son superiores al promedio nacional, así como el volumen de azúcar obtenida por hectárea cosechada. Uno de los más productivos es el Ingenio de Tala, ubicado en el municipio de el mismo nombre, pertenece al Grupo Azucarero México y produjo en la zafra 2022-2023 poco más de 1.8 millones de toneladas de caña molida y con un promedio de 73.4 toneladas de caña por hectárea (MAM, 2024).

A través de los talleres y pláticas informales con productores de la zona abastecedora del ingenio Tala, se identificaron diversos problemas de índole social, económico, político, ambiental y organizacional. Todos los problemas tienen origen e impacto diferente, pero todos llevan a una consecuencia unilateral: la producción de caña de azúcar. Las actividades que los productores realizan para mejorar la producción de caña se basan en su mayoría, en el uso de productos químicos, aunque desde hace 3 o 4 años, algunos han recurrido al uso de bioinsumos o productos agroecológicos. En este sentido, en el área de abastecimiento se identifican tres diferentes tipos de manejo agronómico, y que son tanto para manejo de plagas y enfermedades, como para el mejoramiento productivo (suelo-planta): manejo convencional, mixto y agroecológico.

El manejo convencional es el proceso en el que se utiliza maquinaria agrícola y productos químicos para el mejoramiento productivo y para el control de plagas y enfermedades. En las áreas de abastecimiento el manejo convencional se basa en el uso de compuestos químicos para problemas de malezas, plagas como el barrenador de la caña (*Diatraea saccharalis*) y algunos para el manejo de roedores. Los químicos más frecuentes en el área de estudio son: el 2-4D, el Ametrin y Atrazina, en presentaciones como Novamina, Caña Z y Caña D. Estos compuestos son usados durante la etapa de crecimiento “pelillo” y durante el periodo máximo de desarrollo. Frecuentemente, se utilizan 4 litros de productos por cada 200 litros de agua (varía según compuesto) y es asperjado homogéneamente en toda la parcela, ya sea por vía terrestre (aspersor) o aérea (dron).

También suelen utilizar fertilizantes como potasio o nitrógeno (no indicaron nombre o marca) a veces hasta 2 aplicaciones por año (comentado por productores de la zona). También hay otros compuestos que se usan en el área de abastecimiento de caña de azúcar del Ingenio Tala, aunque su frecuencia y uso no han sido comprobadas en campo. Cabe mencionar que, aunque en las parcelas con manejo convencional se utilicen productos químicos, se comienza desde hace 3 o 4 años,



hacer uso de productos orgánicos, como lo son lixiviados de gallinaza con aplicación frecuente de dos veces por año a dosis de 80 litros sobre 250 litros (comentado por productores de parcelas monitoreadas).

En el caso del manejo agroecológico en la caña de azúcar, los procesos siguen siendo complementarios, ya que la mayoría sigue usando compuestos químicos, aunque cada vez más productores prefieren usar alternativas más ecológicas, ya que han expresado que al usar productos ecológicos, la planta, el suelo y la producción han mejorado. En la zona han surgido biofábricas, principalmente alentadas por los propios productores de caña de azúcar y ayudados por técnicos de la Secretaría de Agricultura, a través del Programa para el Bienestar y el INIFAP. En dichas biofábricas se producen bioinsumos provenientes de lixiviados y purín de gallinaza, lixiviados lombriz, humus lombriz, hormonas, bioles, caldos minerales y ácidos húmicos. Dichos productos son distribuidos a los miembros de la biofábrica de forma gratuita y a la venta a productores que estén interesados en dicho producto. En muchas parcelas, se comienza a usar más frecuentemente estos bioinsumos, ya que son más baratos y aparentemente se tiene un efecto favorable en la planta.

De los problemas fitosanitarios más recurrentes en la zona son la mosca pinta (*Aeneolamia* spp), el barrenador de la caña de azúcar (*Diatraea saccharalis*), langosta (*Schistocerca*), hongos como la roya naranja, o mamíferos como las ratas y topos. Sin embargo, la presencia de malezas es la que generar mayor daño al cultivo, donde los productores deben estar monitoreando constantemente sus parcelas, porque si no lo hacen, las malezas afectan severamente el cultivo y requieren obligadamente el uso de agroquímicos o tendrán pérdidas importantes en la productividad. En el caso de nemátodos y hongos, no son problemas graves como en otras zonas cañeras del país, y en algunos casos, la presencia de estos tipos de plagas, ni si quiera son monitoreadas.

La caña de azúcar con afectaciones por *Diatraea saccharalis* regularmente provoca amarillamiento en la planta, ya que hacen túneles o galerías dentro del tallo, disminuyendo el flujo de agua y nutrientes den la planta, además de afectar el cogollo también conocido como corazón muerto (Alvarez y Pérez, 2004). En el caso de las áreas monitoreadas con barrenador de la caña de azúcar, la distribución en las parcelas fue limitadas, aunque se notaron áreas con afectaciones. En la figura 4, se muestra la firma espectral de la caña de azúcar con afectaciones por la presencia de barrenador, en contraste con la firma espectral de caña sin afectaciones de plaga, es decir, la caña de azúcar estaba aparentemente “sana”. Las diferencias espectrales se notan en toda la longitud de onda medida (450 – 900 nm), aunque existe mayor separabilidad en la banda verde (500 – 600 nm) y en los infrarrojos (> 700 nm). La reflectividad en toda la longitud de onda, y especialmente en estas últimas bandas,

se debe al efecto bioquímico que ocurre en la planta, particularmente en la disminución del nitrógeno, que lleva a la planta a requerir mayor energía para realizar la fotosíntesis (Abdel-Rahman et al., 2010).

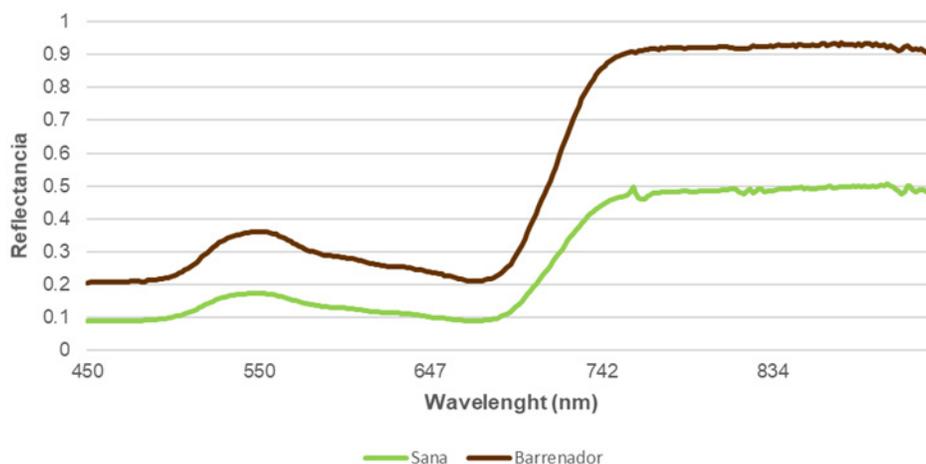


Figura 4. Firma espectral de la caña de azúcar bajo condiciones de salud aparente y con afectaciones por la plaga barrenador en el área de abastecimiento del Ingenio Tala, Jalisco

Fuente: elaboración propia

También con el muestreo de firmas espectrales de la caña de azúcar se logró caracterizar los diferentes tipos de variedades y la etapa fenológica en la que se encontró, esto con ayuda del productor de la parcela. La Figura 5 muestra los espectros de las variedades RD-7511, MEX-57-473 y CP-72-2086 que corresponden a las variedades más representativas del área de abastecimiento de caña del Ingenio Tala. Las diferencias marcadas se deben en gran medida al grosor y pigmentación de la hoja, su composición celular y la cantidad de agua del tejido foliar (Olvera, 2016). La variedad RD75 – 11 (originaria de República Dominicana) tiene un color de amarillo a verde, según la etapa fenológica, además de ser resistente a enfermedades como la roya (*Puccinia kuehni*) o el carbón (*Sporisorium scitamineum*). Para las variedades CP-72-2086 y MEX-57-473 las condiciones vegetativas están dadas posiblemente por los suelos, la restricción de agua o el manejo agrícola (García, 2018). La separación entre las respuestas espectrales es más marcada entre las variedades RD-7511 y la Mex-57-473, ya que en toda la longitud de onda medida existe hasta 30% de separación, y en donde la posible causa sea la diferencia en las etapas fenológica (diferencia de 70 a 90 días), mientras que la CP-72-2068 presenta un amarillamiento en su etapa madura.

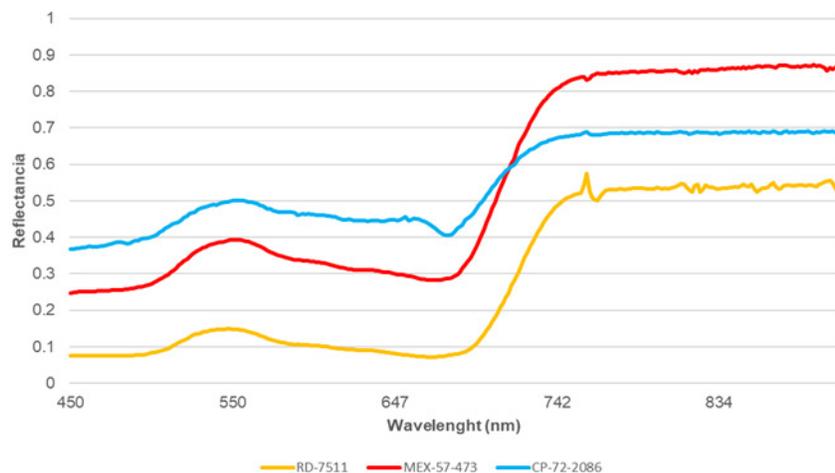


Figura 5. Firma espectral por variedades de la caña de azúcar producidas en el área de abastecimiento del Ingenio Tala, Jalisco

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, las imágenes capturadas por el VANT fueron de 10 parcelas hasta ahora monitoreadas. De estas, se obtuvieron en promedio 300 imágenes capturadas con diferentes longitudes de onda por parcela. El proceso para la generación de los ortomosaicos se realizó en el software Agisoft Metashape Professional. Posteriormente, los ortomosaicos generados se les aplicó un NDVI para generar una primera impresión de las imágenes del territorio. De las 10 parcelas monitoreadas, 5 realizan actividades predominantemente agroecológicas (aunque siguen usando agroquímicos, pero con menor frecuencia) y 5 parcelas en donde predominantemente usan métodos convencionales para mejorar la productividad y combatir plagas y enfermedades. En total, se acumularon 88 hectáreas fotografiadas con cámaras infrarrojas. En las parcelas con aplicaciones agroecológicas se realizan aplicaciones de diversos bioinsumos proporcionados por las biofábricas de la región. Algunas de estas parcelas son de productores que pertenecen al grupo de productores de la biofábrica de Ahuisculco, Tala.

De forma general, los índices de vegetación (NDVI) muestran que la “salud” de la caña de azúcar es mejor en las parcelas en donde realizan manejo mixto que en donde el manejo predominante o exclusivo es el convencionales (Figura 6). Las intensidades de colores orientados más hacia los verdes fuertes indican que la vegetación está más saludable o no presenta daños por plaga o deficiencias nutrimentales, los colores que van más hacia los amarillos y naranjas, indican que la vegetación puede estar sometida a algún problema, ya sea asociado a plagas, enfermedades, falta de agua, deficiencias nutrimentales o algún problema fisiológico. Las diferencias más marcadas se pueden ver en el valor numérico del NDVI. En el manejo convencional los valores están entre el 0.33 y el 0.41, además de que en los histogramas se observa poca densidad en los picos más altos, mientras que en el manejo mixto (uso de agroquímicos con bioin-

sumos) los valores están entre el 0.38 y el 0.51. A nivel campo, las parcelas que tiene manejo mixto se pueden observar más vigorosos en el verdor de las hojas, además de que los productores han notado un mejoramiento en las condiciones del suelo.

Los productores han explicado que el uso de los agroquímicos es necesario, ya que la presencia espontanea de malezas puede provocar mayores pérdidas, que las generadas si no usaran herbicidas, sin embargo, han notado un cambio importante tanto en la planta como en el suelo, cuando mezclan productos (químico y biológico), reconocen una mejor eficiencia y mayor rendimiento, principalmente en los procesos de fertilización. En el área de abastecimiento de caña de azúcar del ingenio Tala ya se reportan algunos productores que no han usado químicos en dos o tres años.

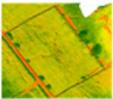
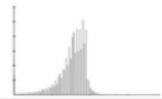
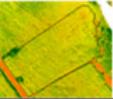
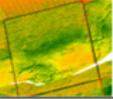
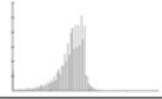
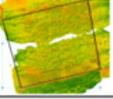
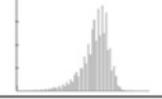
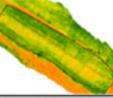
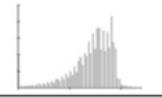
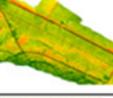
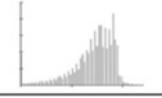
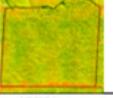
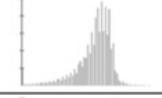
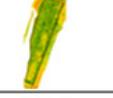
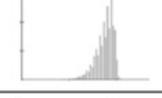
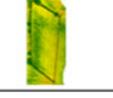
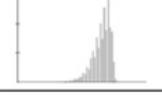
Manejo convencional		
Parcela	Histograma	NDVI promedio
		0.37
		0.35
		0.41
		0.33
		0.34
Manejo convencional-agroecológico		
		0.49
		0.42
		0.38
		0.51
		0.47

Figura 6. Índices Normalizados de Vegetación de parcelas de caña de azúcar con manejo convencional y convencional – agroecológico del área de abastecimiento del Ingenio Tala, Jalisco
Fuente: elaboración propia



Conclusiones

El uso de procesos tecnológicos de índole geográfica, como el que proporcionan la espectroradiometría de campo y la fotogrametría en conjunto, puede permitir desarrollar estrategias de planeación y gestión territorial, especialmente en lo que respecta al uso de agroquímicos. Se pueden generar escenarios o modelos espaciales que muestren lugares que tienen problemas agronómicos o fitosanitarios, en donde a través de la cartografía generada, se decida realizar procesos dirigidos de manejo agronómico, que implique un uso menor de productos, para de esa forma reducir gradualmente el impacto ambiental y/o de salud que se genera al usar productos químicos. Se cree que estos procesos pueden aumentar el valor agregado del cultivo, así como mejorar los rendimientos productivos, reducir el costo en la compra de insumos agroquímicos, aumente el uso de productos biológicos y como consecuencia se genere menor impacto al ambiente y en la salud de las poblaciones circundantes.

Conflicto de intereses

“Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.”

Financiamiento

Financiamiento por parte del proyecto “Sistema de gestión territorial sustentable de la caña de azúcar con espectroradiometría y fotogrametría” con clave CF-2023-I-2586, de la convocatoria de Ciencia de Frontera 2023 del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

Agradecimientos

Se agradece a los productores de caña de azúcar de los municipios de Tala y Teuchitlán, a los productores de la biofábrica de Ahuisculco, Tala, al Ing. Pedro Martel Vargas. del Programa Producción para el Bienestar. Se agradece también a la Unión Local de Productores de Caña de Azúcar A.C. (ULPCA) y la Unión Nacional de Cañeros (UNC-CNPR) en el municipio de Tala, Jalisco.

Referencias

- Abdel-Rahman, E. M., Ahmed, F. B., & Van den Berg, M. (2010). Estimation of sugarcane leaf nitrogen concentration using in situ spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, S52-S57. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.003>
- Aguilar-Rivera, N. (2012). The Mexican sugarcane industry, overview, constraints, current status and long-term trends. *Springer Sugar Tech*, 14(3), 207-222



- Aguilar-Rivera, N. (2016). Sustainable Sugarcane Bagasse Cellulose for Papermaking. En A. Tiwari, N. Arul Murugan, & R. Ahuja (eds.), *Advanced Engineering Materials and Modeling* (pp. 121-163). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119242567.ch4>
- Álvarez, M. C. & Pérez, J. F. D. (2004). *Resultados del monitoreo para diagnóstico y control de poblaciones de barrenadores del tallo en caña de azúcar de los municipios: El Grullo-Autlán-El Limón en Jalisco. Primer año. Documento 1*. INIFAP-CESAVEJAL-Asociación de agricultores del Valle el Grullo-Autlán. Jalisco, México. Recuperado de <https://siiba.conadesuca.gob.mx/siaca/Consulta/verDoc.aspx?num=48>
- Awad, M. M. (2018). *Crop Mapping Using Hyperspectral Data and Technologies - A Comparison Between Different Supervised Segmentation Algorithms*. Sofia: Surveying Geology & Mining Ecology Management (SGEM). doi: <http://dx.doi.org/10.5593/sgem2018/2.3/S10.012>
- Bolfe, E. (2019). Application of geotechnologies in the development of sustainable agriculture in Brazil. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 6(12), 458-463. <http://dx.doi.org/10.22161/ijaers.612.53>
- CROPSCAN Inc. (1994). *MSR user's Manual*. CROPSCAN Inc. Recuperado de <https://manualzilla.com/doc/5815760/user-s-manual-cropscan--inc>.
- Filippini, J., Flores, C., & Miele, A. (2017). Geotechnologies and soil mapping for delimitation of management zones as an approach to precision viticulture. *Applied and Environmental Soil Science*, 2017, 4180965. <https://doi.org/10.1155/2017/4180965>
- García-Preciado, J. (2018). Evaluación de variables de calidad en Híbridos de *Saccharum* spp. En diferentes ambientes agroecológicos de Jalisco, México. *Agro Productividad*, 10(11). Recuperado de <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/55>
- Hernández-Cázares, A. S. (2014). La agroindustria de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en México. *Agro Productividad*, 7(2). Recuperado de <https://mail.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/511>
- Manual Azucarero Mexicano 2024*. (2024). Cia Editora. Recuperado de https://www.manualazucarero.com/_files/ugd/fc2095_b4e9661cd898438aad336a83992d281.pdf
- Mustashkina, D., Khannanov, M., Kalimullin, M., & Karpova, N. (2021). Development of agriculture based on geographic information technologies. *E3S Web of Conferences*, 282, 07019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128207019>
- Ni, J., Zhang, J., Wu, R., Pang, F., & Zhu, Y. (2018). Development of an Apparatus for Crop-Growth Monitoring and Diagnosis. *Sensors*, 18(9), 3129. <https://doi.org/10.3390/s18093129>



- Olvera Vargas, L. A. (2016). *Variabilidad espacial de las enfermedades de la caña de azúcar en la región Huasteca: implicaciones para su monitoreo con percepción remota* [tesis de doctorado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. Repositorio Institucional UASLP. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/5677>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *Datos sobre alimentación y agricultura, producción mundial*. Recuperado de <https://www.fao.org/faostat/es/#data>
- Pacheco, J., & Martín, M. (2015). Characterization of a field spectroradiometer for unattended vegetation monitoring. key sensor models and impacts on reflectance. *Sensors*, 15(2), 4154-4175. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s150204154>
- Rao, N. R., Garg, P. K. & Ghosh, S. K. (2007). Development of an agricultural crop's spectral library and classification of crops at cultivar level using hyperspectral data. *Precision Agriculture*, 8, 173–185. <https://doi.org/10.1007/s11119-007-9037-x>
- Reddy, G. (2018). Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring, and Management: An Overview. En Reddy G., & Singh S. (eds), *Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management. Geotechnologies and the Environment* (pp. 1 – 18). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-78711-4_1
- Serra, G. y Trumper, E. (2006). Estimating the incidence of corn stem damage produced by *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) larva through assessment of external infestation signs. *AgriScientia*, 23(1), 1-7. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v23.n1.2685>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola – Caña de azúcar*. Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

La importancia del maguey pulquero (*Agave salmiana*) en la alimentación y soberanía alimentaria

Claudia Lizet Higuera-Orbe¹, Sergio Erick García-Barrón² y Lorena Moreno-Vilet^{1*}

¹Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), A.C. Camino el Arenero 1227, El Bajío del Arenal, C.P. 45019, Zapopan, Jalisco, México.

²ESDAI, Universidad Panamericana, Cda. Augusto Rodin, #498, Insurgentes Mixcoac, Benito Juárez, Cp. 03920, Ciudad de México, México.

*Autor de correspondencia: lmoreno@ciatej.mx

Palabras clave:

economía rural, gastronomía mexicana, jarabe de aguamiel, productos tradicionales, pulque.

Resumen

El maguey pulquero es una planta originaria de México con gran importancia cultural, económica y culinaria, especialmente en las regiones del altiplano de clima caluroso y seco, donde se considera una planta clave para la subsistencia y economía local. El maguey ha sido aprovechado durante siglos en la obtención de alimento y bebidas tradicionales como aguamiel, pulque, destilados, jarabes concentrados, gualumbos, quiote, entre otros. Y también en la elaboración de platillos como barbacoa, ximbó e insectos asociados al maguey como chinicuiles y gusano blanco. Sin embargo, la importancia del maguey va más allá de la alimentación, incidiendo en aspectos económicos, sociales, culturales y ambientales, por lo cual se considera un cultivo de gran importancia para lograr una soberanía alimentaria. El presente artículo de revisión explora los diversos usos del maguey pulquero, subrayando la importancia de los productos alimenticios y compuestos bioactivos. Además, se explora el impacto del maguey en la soberanía alimentaria y su potencial en nuevas tendencias alimentarias.

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 235-248.
ISSN. 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14713628>

Recibido: 25 de octubre 2024
Revisado: 30 de noviembre 2024
Aceptado: 12 de diciembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Introducción

El *Agave salmiana*, comúnmente conocido como maguey pulquero (Figura 1), es una planta perenne perteneciente a la familia Asparagaceae (Hernández-Ramos, et al. 2020). Se caracteriza por sus grandes hojas carnosas que forman una roseta basal, y su capacidad para adaptarse a condiciones áridas, lo que lo hace especialmente prevalente en zonas semiáridas de México. Se considera una de las especies más grandes de maguey, alcanzando hasta 3 m de altura (García-Mendoza, 2007).



El maguey no requiere mucha agua ni fertilizantes, por lo cual crece muy bien en regiones de clima seco y caluroso, con suelos poco fértiles. Se encuentra principalmente en las regiones del altiplano mexicano, en los estados de Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, San Luis Potosí, Zacatecas y el Estado de México (Aguilar-Juárez et al., 2014; Moreno-Vilet & Leyva-Trinidad, 2020). Sin embargo, su cultivo también se ha extendido a otras partes del mundo, incluyendo algunas regiones de Sudamérica y Sudáfrica, donde se utiliza tanto con fines alimentarios como industriales (Aguilar-Juárez, Enríquez del Valle, Rodríguez-Ortiz, Granados-Sánchez & Martínez-Cerero, 2014). En 2020 la producción de maguey en México fue de 1,913,026 t, cosechadas de 25,741 ha, un rendimiento promedio anual de 74.3 t/ha (Ángeles-Vázquez & Moreno-Vilet, 2024).

Desde tiempos prehispánicos, el maguey ha sido una planta esencial para las culturas indígenas de México, utilizado en la producción de bebidas consideradas como tradicionales como el pulque, así como en la elaboración de fibras y materiales para construcción. Hoy en día su relevancia sigue significativa tanto en la agricultura como en la gastronomía, y representa una fuente de ingresos para comunidades rurales a través de la producción y comercialización de sus productos. El presente artículo de revisión explora, a través de una búsqueda sistemática de trabajos científicos, los diferentes productos alimenticios derivados del maguey pulquero, con énfasis en la importancia gastronómica, composición química y propiedades nutricionales. Además, se discute el papel de esta planta en la soberanía alimentaria y las perspectivas futuras de los productos derivados de ella y las nuevas tendencias alimentarias.

Múltiples usos del maguey pulquero (*Agave salmiana*)

Históricamente, el maguey está profundamente conectado con la cosmovisión mesoamericana, donde destacó por sus múltiples usos, por lo que también se le denominó como “árbol de las maravillas”. En la cultura Nahuatl se relaciona con la diosa Mayáhuatl, quien es representada como una joven mujer que emerge de una planta de maguey. A veces se la muestra con copas de pulque en las manos, aunque también puede sostener espinas o fibras. Sus aplicaciones en diversas áreas de la vida cotidiana y económica lo convierten en una planta de opción sustentable en algunas regiones de México (Vela, 2024).

Ángeles-Vázquez et al. (2024) mencionan que los pueblos y comunidades de México han desarrollado un vasto conocimiento sobre el uso, conservación, saberes y tradiciones del maguey que es importante documentar y fortalecer para preservar el patrimonio cultural. En la Figura 1 se ilustran algunos usos del maguey. En el ámbito alimenticio se utiliza el tallo, el escapo floral, la savia y los botones florales para la preparación de diversos platillos. Además, se pueden elaborar productos

derivados, como el jarabe de aguamiel, el pulque, destilados, vinagre, jabón, etc. Las hojas del maguey se usan como condimentos, se emplean en la preparación de alimentos como barbacoa y el ximbó, donde se utilizan como envoltorio, además de la obtención de cutícula para los tradicionales mixiotes (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2020).

El maguey tiene un papel importante en la obtención de fibras (ixtle), las cuales se extraen principalmente de las pencas u hojas, estas fibras son utilizadas para la fabricación de bolsas, cepillos y estropajos, promoviendo un sector artesanal y de gran valor cultural, además de fomentar el cuidado por el medio ambiente. Además, en comunidades donde se cultiva el maguey, es común utilizar la penca como material de construcción en casas o establecimientos por su gran resistencia que ayuda como aislante del clima exterior (Cuevas, 2024).



Figura 1. Usos del maguey pulquero
Fuente: creación propia con datos de Angeles -Vázquez & Moreno-Vilet, 2024

Otro uso en la medicina tradicional, es el aprovechamiento de la savia, las hojas y algunos destilados del agave, conocidos por sus propiedades curativas y beneficios para la salud, que han sido documentados en la herbolaria mexicana, además, otros usos destacan en la construcción de paredes o techos, forraje para el ganado, producción de combustible, jabones e incluso la obtención de insectos comestibles (CONABIO, 2020). Las diversas partes de la planta se han adaptado a múltiples propósitos, lo que hace del maguey pulquero una especie crucial en la vida y en la economía de muchas comunidades rurales mexicanas.



Compuestos bioactivos del maguey

Estas plantas son conocidas por su capacidad de sobrevivir en zonas secas, han sido usadas desde la antigüedad para obtener fibras, alimentos y bebidas. En la actualidad se ha investigado el potencial de las especies de maguey para obtener nutraceuticos, prebióticos, edulcorantes entre otros. La composición química de los magueyes consta de: carbohidratos, fibras, proteínas, lípidos, minerales, compuestos bioactivos, entre otros.

El maguey contiene una serie de bioactivos, incluyendo fibra soluble como los fructanos, fitoquímicos como las saponinas y sapogeninas y compuestos fenólicos, conocidos por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias o antimicrobianas. Los fructanos, también denominados agavina, es un polisacárido de reserva energética de la planta y se obtiene del tallo o piña de maguey. Los fructanos se destacan por su capacidad de promover la salud intestinal al actuar como prebióticos, estimulando el crecimiento de bacterias benéficas en el tracto digestivo (Castañeda Ovando et al., 2023). Los compuestos bioactivos del maguey, como las saponinas y los flavonoides, han demostrado tener efectos positivos en la reducción de enfermedades crónicas como la diabetes, enfermedades cardiovasculares y algunos tipos de cáncer (Leal-Díaz et al., 2015; Santos-Zea et al., 2012).

Los productos derivados del maguey como el pulque, el aguamiel, el jarabe de aguamiel, entre otros, son ricos en compuestos bioactivos. La fermentación, además de generar probióticos, también puede aumentar la biodisponibilidad de ciertos compuestos como los polifenoles. Estos productos, al ser consumidos de manera responsable, pueden proporcionar beneficios para la salud (Hernández-Domínguez et al., 2023).

Productos alimenticios del maguey

Los alimentos no solo proporcionan nutrientes y energía al ser humano, sino que también cumplen funciones importantes en la vida cotidiana, en las creencias y valores de las comunidades que los consumen. Esto se debe a las diversas connotaciones simbólicas que tienen, las cuales están conectadas con la herencia y la identidad cultural de cada sociedad (García-Barrón, et al., 2024). Lo anterior podría explicar la importancia del maguey en el contexto alimenticio, ya que, desde tiempos prehispánicos, esta planta ha sido un componente fundamental en la alimentación, ya sea como ingrediente o como proveedor de otros elementos (Camacho-Ruíz, et al. 2023). A continuación, se detallan los diferentes platillos donde el maguey es un componente fundamental. En la Tabla 1 se describen algunos productos alimenticios donde el maguey es un componente fundamental.



Tabla 1. Principales productos alimenticios del maguey pulquero

Producto	Obtención / Elaboración	Características	Aplicaciones	Beneficios para la salud	Referencia
Aguamiel	se da en maguey maduro. Extracción por etapas desde la castración hasta la raspa del maguey.	Líquido incoloro, transparente, con sabor dulce, rico en azúcares naturales	Endulzante natural	Efecto probiótico y prebiótico	(Hernández-Ramos et al., 2020; Huezcas-Garrido et al., 2022)
Pulque	Bebida blanca, lechosa, viscosa y ligeramente ácida.	Bebida fermentada que aporta nutrientes como carbohidratos, proteonas, vitaminas y minerales	Bebida, ingrediente en la elaboración de pan	Favorece la salud intestinal	(González-Montemayor et al., 2022; Huezcas-Garrido et al., 2022; Hernández-Ramos et al., 2020)
Jarabe de aguamiel	Concentrado por calor del aguamiel obtenido del maguey	Viscoso, sabor dulce, color ámbar claro a oscuro	Endulzante, uso en bebida	Actividad antidiabética y anticancerígena	(González-Montemayor et al., 2022; Santos-Zea et al., 2016)
Barbacoa / Ximbó	Se obtiene utilizando las hojas del maguey para envolver la carne y cocerla en un horno bajo tierra	Aporta un sabor único debido al contacto con las hojas del maguey	Preparación de platillos tradicionales como la barbacoa o el ximbó		(CONABIO, 2020; González-Romero et al., 2023)
Gualumbos	Botones florales recolectados antes de abrirse y cocidos o salteados.	Sabor amargo	Ingrediente en guisos o platillos regionales	Ricos en vitaminas y minerales	(Figueredo-Urbina, 2020)
Insectos (Chinicuil y gusano blanco de maguey)	Se obtienen de las raíces, hojas, pencas del maguey.	Notas de sabor atípicas	Fritos con mantequilla, en salsa, asados, entre otros	Ricos en proteínas y lípidos	(Onofre-Sánchez et al., 2022)
Tallo (Huevito)	Tallo floral joven, recolectado antes de la floración, cocido.	Sabor dulce con textura suave	Se consume como verdura cocida, se usa en guisos locales.	Aporta fibra y carbohidratos	(González-Romero et al., 2023)

El aguamiel es la savia que exuda el tallo del maguey pulquero que se produce cuando el maguey alcanza su madurez fisiológica. La relación entre la edad cronológica y la madurez fisiológica varía según las condiciones climáticas y altitud donde se cultive el maguey (Godínez-Hernández et al., 2015). Así, por ejemplo, en zonas áridas, se favorece una madurez temprana de la planta entre 7 y 8 años, lo cual acelera el proceso para producción de aguamiel, mientras que en zonas de mayor altura la madurez del maguey puede ser hasta los 12 o 14 años. El aguamiel se recolecta manualmente mediante el raspado del cajete hecho del corte previo del escapo floral del maguey como se observa en la Figura 2. El tiempo de colecta del aguamiel dura de 3 a 6 meses, con un rendimiento promedio de 2 a 4 litros por día, después de ese tiempo el maguey muere (Muñiz, 2013, citado en Ramírez-Cuellar, et al. 2018). El tlachiquero es la persona encargada de raspar y recolectar el aguamiel cada 8 a 12 h mediante succión con la ayuda de un acocote (Figura 3). El aguamiel se puede consumir directamente o bien se pasteuriza en casa y se envasa para su distribución y venta en mercados de comunidades cercanas, donde es conocida por su sabor muy dulce y agradable. Se ha reportado que el aguamiel tiene composición muy variada



dependiendo del maguey, variedad, zona de cultivo y periodo de cosecha (Moreno-Vilet & Leyva-Trinidad, 2020). El componente principal son los carbohidratos que contienen de 50 a 140 g/L de azúcares simples, donde la sacarosa se encuentra en mayor proporción entre 40-130 g/L (Pérez- Vargas, 2020). También contienen en menor cantidad proteínas, fructanos de agave, minerales como Calcio, Magnesio y Vitamina C (Castañeda Ovando et al. 2023).



Figura 2. Planta de maguey de la especie *Agave salmiana*, Izquierda: Plata completa, Derecha: cajete (Rancho la Gaspareña - Singuilucan, Hidalgo)
Fuente: propia



Figura 3. Herramientas tradicionales para el capado y extracción de aguamiel (Tinacal Los Tuzos, Singuilucan, Hidalgo)
Fuente: propia

El pulque es una bebida de color blanco, lechosa, viscosa y ligeramente ácida con contenido alcohólico entre 4 a 7° GL que resulta de la fermentación ácido-láctica

y alcohólica del aguamiel (Lappe-Oliveras et al., 2008), por lo cual se ha descrito su sabor complejo entre dulce, ácido y fermentado. El significado que los pueblos le atribuyen al pulque se asocia al trabajo, alimento, estilo de vida y cultura. El pulque era consumido en ceremonias en la época prehispánica y alcanzó su auge en el siglo XIX y principios del XX, pero el cambio en los hábitos de consumo llevó a su disminución. En la actualidad, el pulque ha recuperado su popularidad, especialmente entre los jóvenes consumidores (Rojas-Rivas et al., 2019).

El jarabe de aguamiel se obtiene a partir de la concentración lenta en ollas de barro, cobre o acero inoxidable para evaporar el exceso de agua. A medida que el aguamiel se reduce, se espesa y adquiere una consistencia viscosa hasta obtener el producto final como un jarabe a 70° Brix rico en minerales y nutrientes que se utiliza como un endulzante natural (Espíndola-Sotres et al., 2018). En los últimos años se han desarrollado proyectos de investigación (CONAHICYT- PRONACES 317510) en torno al jarabe de aguamiel para impulsar su comercialización buscando el posicionamiento y diferenciación del producto. En este sentido, se han desarrollado platillos gourmet utilizando aguamiel y jarabe de aguamiel como ingrediente principal, como los que se muestran en la Figura 4.



Figura 4. Platillos preparados con aguamiel y jarabe de aguamiel. De izquierda a derecha: entrada, albóndigas y postre

Fuente: propia

La barbacoa tradicional mexicana también aprovecha las hojas del maguey. La barbacoa es un platillo tradicional, que se elabora principalmente con carne de borrego, aunque también puede prepararse con pollo. Para su elaboración, la carne se envuelve en pencas de maguey y se cuece en un horno de tierra. En el centro de México, este platillo ha sido tradicional desde tiempos prehispánicos (Avilés-Cano, 2016). Cuando se introdujeron al país animales como los borregos y chivos, la barbacoa empezó a prepararse como la conocemos hoy en día (Avilés-Cano, 2016; Larousse, 2021). Es un alimento procesado que resulta de la transformación de sus ingredientes mediante técnicas tradicionales de la región (García-Barrón et al., 2022).

Otro alimento más es el ximbó, comida típica del estado de Hidalgo. En otomí, lengua hablada en el Valle del Mezquital, su nombre significa “envoltura o envuelto” y proviene de las palabras *xi* (penca) y *mbo* (de), que se traduce como “dentro de la pen-



ca”. Entre los otomíes de Hidalgo se llamaba ximbó a cualquier preparación envuelta en penca de maguey y cocida en horno de tierra (Avilés-Cano, 2016). Esta preparación es una variante de la barbacoa, en la que se utiliza pollo o cerdo, acompañado de verduras como el nopal, además de especias y chiles secos molidos (Avilés-Cano, 2016).

La flor de maguey, también conocida como gualumbo (del otomí, *uadombo*; *uada* maguey; *don* flor y *bo* quiote), es un manjar apreciado en la gastronomía de México. Dado que el maguey solo florece una vez en su vida, las comunidades indígenas recogen solo una parte de las flores para proteger la especie. Los gualumbos se consumen antes de que florezcan y se recomiendan quitar el tallo y el pistilo, dejando únicamente el pétalo. Son una excelente fuente de proteína y suelen consumirse durante la cuaresma, ya que su época de floración coincide con esta celebración (Osegueda, 2021; Figueredo-Urbina, 2020). Figueredo-Urbina (2020) menciona dos formas en las que se pueden recolectar los gualumbos, la primera es amarrando una roca en el extremo de una cuerda, esta se lanza hacia las flores y se jala para que estas caigan, la segunda es cortando todo el quiote y, una vez en el suelo, se recolectan las flores. Estas flores son ricas en vitaminas y minerales como calcio, fósforo, hierro y potasio, aportando no solo sabor, sino también valor nutricional a cada uno de los platillos. El tallo (huevito) se consume cocido y es apreciado por su sabor y textura, además de sus propiedades nutricionales.

El chinicuil, cuyo nombre proviene del náhuatl *chilocuilin*, que se traduce como “gusano de chile”, de nombre científico *Comadia redtenbacheri*, es una plaga que afecta el maguey, en particular especies como el *Agave angustifolia* y el *A. salmiana* durante la temporada de lluvia. Estos insectos perforan los tallos y hojas del maguey (Llana-Cázares, et al., 2017). Los chinicuiles son comestibles y se pueden disfrutar de diversas maneras: crudos, tostados, fritos, sazonados, en una salsa picante o incluso en el fondo de una botella de mezcal. Ángeles-Vázquez & Moreno-Vilet (2021) comentan que la recolección y la cría de chinicuil pueden generar una oportunidad empresarial sustentable y además contribuiría a la seguridad alimentaria de las economías en desarrollo. Sin embargo, todavía falta mucho por investigar en áreas como toxicología, química y microbiología de este insecto para establecer el control de sanidad, el manejo adecuado o normas que regulen el correcto proceso de producción, recolección y distribución.

Gusano blanco de maguey (*Acentrocneme hesperiaris*): larva de una mariposa que crece en el centro de las pencas basales del maguey. La temporada de producción y consumo es en primavera y verano. Su origen es primordialmente en Hidalgo. Este gusano de color blanco, lejos de ser una plaga dañina, ha alcanzado una importancia a nivel económico y un alto prestigio gastronómico, siendo apreciado por todos los sectores de la sociedad mexicana. Comúnmente se consumen tostados



o fritos, acompañados con tortillas de maíz en forma de taco. Onofre-Sánchez, et al. (2022) mencionan que el consumo de insectos ofrece importantes beneficios tanto ambientales como para la salud y la sociedad. Se requiere muy poca agua para su supervivencia, lo que los convierte en una opción sostenible. Son una excelente fuente de proteínas, ricos en fibra y micronutrientes. La recolección de insectos en áreas rurales no solo mejora su alimentación, sino que también puede convertirse en una fuente de ingresos a través de su comercialización.

En conjunto, estos productos derivados del maguey no solo reflejan la riqueza gastronómica de México, sino que también son testimonio de cómo esta planta ha sido aprovechada integralmente a lo largo de generaciones para ofrecer alimentos saludables y nutritivos, con un profundo valor cultural, social y económico.

Soberanía alimentaria

La importancia del maguey no solo radica en el aspecto alimenticio, sino también en lo económico, social, cultural y ambiental, considerándose un cultivo de gran importancia para lograr una soberanía alimentaria. La soberanía alimentaria defiende el derecho de los pueblos a definir sus propios sistemas alimentarios, priorizando la producción local, sostenible y culturalmente adecuada. De esta forma, el maguey apoya en la alimentación, adaptación al cambio climático, fomento de la economía local y rescate de prácticas agroecológicas, entre otras.

En el aspecto ambiental, el maguey es una planta que requiere pocos recursos para su cultivo, lo que la convierte en una opción sostenible para la agricultura. Su capacidad para crecer en condiciones áridas reduce la necesidad de riego y el uso de pesticidas, favoreciendo la autonomía al no requerir insumos externos (Aguilar-Juárez et al., 2014; García-Mendoza, 2007; Narváez-Suárez, 2016). Debido a su resistencia a la sequía, se adapta bien al cambio climático, y su cultivo puede contribuir a la mitigación de los efectos ambientales, siendo una opción viable para la reforestación de áreas degradadas.

Una de las prácticas del manejo de varias regiones del país con relieves orográficos han sido los metepantles, la cual es una práctica agrícola ancestral (Figura 5). Su sistema refleja la gran sinergia que existe entre sus elementos, uno conformado por la trilogía de la milpa: maíz, frijol y calabaza y el otro, el sistema forestal, representado por los magueyes, que son cultivados en hileras, deteniendo la tierra para que no se deslave (Ángeles-Vázquez et al., 2024). Al promover el cultivo de maguey bajo sistemas agrícolas tradicionales y sostenibles, se fomenta una agricultura sustentable, favoreciendo la diversidad genética, libre de monocultivos, agroquímicos y semillas genéticamente modificadas, lo cual refuerza la autonomía frente a la agricultura industrial.



En el aspecto económico y social, el cultivo del maguey pulquero tiene un impacto positivo en las economías rurales, proporcionando una fuente de ingresos estable para familias campesinas y fomentando la preservación de tradiciones agrícolas (Narváez-Suárez, 2016). Los productos del maguey tienen un gran potencial para expandirse a nivel internacional, especialmente en mercados que buscan opciones naturales y saludables. El jarabe de aguamiel, el pulque, los fructanos y otros derivados del maguey son ingredientes ideales para la gastronomía ya que ofrecen alternativas naturales a productos refinados o de origen animal. Por lo que continúa siendo una fuente de inspiración para la creación de nuevos productos alimentarios, y se espera que su versatilidad siga abriendo puertas a innovaciones en la gastronomía en el futuro.



Figura 5. Metepantle en el municipio de Singuilucan, Hidalgo

Fuente:

Conclusiones

El maguey desempeña un papel fundamental en la gastronomía mexicana, tanto en su forma tradicional como en su aplicación moderna. Sus propiedades nutricionales, impacto sostenible y potencial en la economía lo convierten en un producto de alto valor en términos de sostenibilidad y desarrollo de productos, por otro lado, no solo contribuye a la biodiversidad, sino que también sostiene economías rurales, lo que lo convierte en un elemento esencial de la agricultura sostenible y la innovación en la industria alimentaria en México. El manejo agroecológico del maguey pulquero en las comunidades del altiplano es un buen ejemplo para promover la soberanía alimentaria y para conservar un recurso natural y cultural que ha sido parte integral de la identidad mexicana durante siglos. Por lo tanto, es fundamental seguir contri-



buyendo en la investigación, además de promover el cultivo y uso del maguey pulquero, asegurando su conservación y sustentabilidad para las futuras generaciones.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Agradecimientos

Al proyecto CONAHCYT PRONACES 317510. La autora CLHO agradece el apoyo de la beca de maestría con número de apoyo 1263731 de CONAHCYT.

Referencias

- Aguilar-Juárez, B., Enríquez del Valle, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Granados Sánchez, D., & Martínez Cerero, B. (2014). El estado actual de *Agave salmiana* y *A. mapisaga*. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 1(2), 106-120. <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/288/255>
- Angeles-Vázquez, B. V., & Moreno-Vilet, L. (2021). Chinicuiles: Un “super alimento” “Todo lo que se arrastra, camina, corre o vuela, va a la cazuela”. *TecnoAgave*, 69(3), 16–18. Recuperado de <https://www.tecnoagave.com.mx/>
- Ángeles-Vázquez, B. V., & Moreno-Vilet, L. (2024). Aprendizajes en el manejo del sistema maguey en México: agricultura industrial vs campesina. En C. Alvarado Osuna, E. Sánchez Osorio, M. Flores López, J. Sánchez Gómez, G. Valdivia Najar, G., & S. E. García Barrón (coords.), *Aprendizajes en la ruta hacia el intercambio de saberes entre la comunidad y la academia en sistemas de producción de alimentos* (pp. 123-148). CIATEJ. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11043763>
- Avilés-Cano, R. (2016). *Patrimonio cultural gastronómico, turismo y signos distintivos de calidad. Innovaciones para el desarrollo económico territorial en Actopan, Hidalgo* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.]. Repositorio institucional UCM. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/27080>
- Castañeda-Ovando, L. Moreno-Vilet, J. Jaimez-Ordaz, J. Ramírez-Godínez, E. Pérez-Escalante, A.E. Cruz-Guerrero, E. Contreras-López, S.A. Alatorre-Santamaría, F.J. Guzmán-Rodríguez, L.G. González-Olivares (2023). Aguamiel syrup as a technological diversification product: Composition, bioactivity and present panorama. *Future Foods*, (8), 100249. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100249> .
- Camacho Ruíz, R. M., Gutiérrez Mora, A., & Gschaedler Mathis, A. C. (eds.). (2023). *Los agaves y sus derivados: tendencias científicas, uso sostenible y patrimonio*. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12667946>



- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2020). *Que nos aportan los agaves*. Biodiversidad Mexicana. https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/que-nos-aportan/N_agaves.
- Cuevas Arturo. (s.f.). *Ixtle: La fibra natural del desierto*. México desconocido. Recuperado el 9 de diciembre de 2024, de <https://www.mexicodesconocido.com.mx/ixtle.html>
- Espíndola-Sotres, V., Trejo-Márquez, M. A., Lira-Vargas, A. A., & Ramírez-Ortíz, M. E. (2018). Estandarización del proceso de elaboración de jarabe a partir de aguamiel. *Investigaciones de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(4), 515-521. Recuperado de <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume3/4/9/86.pdf>
- Figueredo-Urbina, C. J. (2020). Los gualumbos: deleite gastronómico del estado de Hidalgo. *Herreriana*, 2(1), 26-29. <https://doi.org/10.29057/h.v2i1.5571> <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/herreriana/issue/archive>
- García-Barrón, S. E., Leyva-Trinidad, D. A., & Verdugo-Fuentes, A. A. (2024). Muestras gastronómicas en el Alto Mezquital, Hidalgo: Una oportunidad para fomentar la cocina tradicional Hñähñu. En C. Alvarado Osuna, E. Sánchez Osorio, M. Flores López, J. Sánchez Gómez, G. Valdivia Najjar, G., & S. E. García Barrón (coords.), *Aprendizajes en la ruta hacia el intercambio de saberes entre la comunidad y la academia en sistemas de producción de alimentos* (pp. 173-189). CIATEJ. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11043763>
- García-Barrón, S. E., Rivera-Muñoz, R. E., Camacho, D., Pérez-Camarillo, J. P., & Leyva-Trinidad, D. A. (2022). Representation of the concept “Traditional food”. *Agrociencia Uruguay*, 26(NE3). e964. <https://doi.org/10.31285/AGRO.26.964>
- García-Mendoza, A. J. (2007). Los agaves de México. *Ciencias*, (87), 14-23 Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. México <https://www.redalyc.org/pdf/644/64408704.pdf>
- González-Montemayor, A. M., Solanilla-Duque, J. F., Flores-Gallegos, A. C., Serrato-Villegas, L. E., Morales-Castro, J., González-Herrera, S. M., & Rodríguez-Herrera, R. (2022). Temperature effect on sensory attributes, thermal and rheological properties of concentrated aguamiel syrups of two Agave species. *Measurement: Food*, 7, 100041. <https://doi.org/10.1016/j.meaf00.2022.100041>
- González-Romero, J. Y., Rodríguez-Martínez, J. S., & Testón-Franco, N. (2023). Gastronomy as a tourist factor in the State of Hidalgo. *Boletín Científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca*, 9, 13–20. <https://doi.org/10.29057/est.v9il7.11417>
- Godínez-Hernández, C. I., Aguirre-Rivera, J. R., Juárez-Flores, B. I., Ortiz-Pérez, M. D., & Becerra-Jiménez, J. (2016). Extraction and characterization of *Agave*



- salmiana* Otto ex Salm-Dyck fructans. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(1), 59–72. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.02.007
- Hernández-Domínguez, E. M., Álvarez - Cervantes, J., & López - Vázquez, E. (2023). Aprovechamiento de compuestos bioactivos en el agave y sus productos. En *Magüey aguamiel/pulque: una visión para el desarrollo territorial* (147-170). Consejo Editorial/ El Colegio del Estado de Hidalgo
- Hernández-Ramos, L., García-Mateos, R., Ybarra-Moncada, M. C., & Colinas-León, M. T. (2020). Nutritional value and antioxidant activity of the magüey syrup (*Agave salmiana* and *A. mapisaga*) obtained through three treatments. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(3), 1306–1316. <https://doi.org/10.15835/NBHA48311947>
- Huezcas-Garrido, L., Alanís-García, E., Ariza-Ortega, J. A., & Zafra-Rojas, Q. Y. (2022). By-products of *Agave salmiana* of nutritional and functional interest. *Revista Chilena de Nutrición*, 49(2), 250–262. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182022000200250>
- Lappe-Oliveras, P., Moreno-Terrazas, R., Arrizón-Gaviño, J., Herrera-Suárez, T., García-Mendoza, A., & Gschaedler-Mathis, A. (2008). Yeasts associated with the production of Mexican alcoholic nondistilled and distilled *Agave beverages*. *FEMS Yeast Research*, 8(7), 1037–1052. <https://doi.org/10.1111/j.1567-1364.2008.00430.x>
- Larousse Cocina. (2021). Barbacoa. En *Diccionario enciclopédico de la Gastronomía Mexicana*. Consultado el 20 de octubre de <https://laroussecocina.mx/palabra/barbacoa-2/>
- Larousse Cocina. (2023). Mixiote. En *Diccionario enciclopédico de la Gastronomía Mexicana*. Consultado el 20 de octubre de <https://laroussecocina.mx/palabra/mixiote/>
- Leal-Díaz, A. M., Santos-Zea, L., Martínez-Escobedo, H. C., Guajardo-Flores, D., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Serna-Saldivar, S. O. (2015). Effect of *Agave americana* and *Agave salmiana* Ripeness on Saponin Content from Aguamiel (*Agave Sap*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(15), 3924–3930. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00883>
- Llanderal-Cázares, C., Castro-Torres, R., & Miranda-Perkins, K. (2017). Bionomía de comadía *redtenbacheri* (Hammerschmidt, 1847) (Lepidoptera: Cossidae). *SHILAP Revista de lepidopterología*, 45(179), 373–383. <https://doi.org/10.57065/shilap.928>
- Moreno-Vilet, L., & Leyva-Trinidad, D. A. (2020). La miel de magüey un producto artesanal para impulsar el cultivo de una planta ancestral. *TecnoAgave*, (66) 4-8, ISSN 2007-7238. <https://www.tecnoagave.com.mx/>
- Narváez-Suárez, A. (2016). MAGÜEY PULQUERO (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck): OPCIÓN PARA DESARROLLO RURAL. *Agro Productividad*, 9(10).



- Recuperado de <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/832>
- Ramírez-Cuellar, L. I., Alfaro-Rodríguez, C., Ramos-Muñoz, L. G., Hernández-Castañeda, V. N., & Carranza-Concha, J. (2016). Efecto del contenido de sólidos en aguamiel en el rendimiento de jarabe. *Investigaciones de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 3(4), 83-90. Recuperado de <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume3/4/9/83.pdf>
- Rojas-Rivas, E., González-Vázquez, A., & Becerril-Montekio, F. (2019). El patrimonio gastronómico del municipio de Toluca: el caso del pulque y las pulquerías (1841-1920). *Ciencia Ergo Sum*, 26(2), 1-10. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10449880004>
- Osegueda, R. (s. f.). La flor de maguey, un delicioso platillo mexicano. *México Desconocido*. Recuperado el 22 de octubre de 2024. <https://www.mexicodesconocido.com.mx/la-flor-de-maguey-un-delicioso-platillo-mexicano.html>
- Onofre Sánchez, J., Testón Franco, N., & Pinón Vargas, M. (2022). La entomofagia y florifagia en el Valle del Mezquital, Hidalgo México, valor cultural y uso alimentario. *Sosquua*, 4(1), 9–21. <https://doi.org/10.52948/sosquua.v4i1.688>
- Pérez Vargas I. (2020). *Estandarización para la producción artesanal de jarabe de aguamiel hidalguense* [tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Repositorio institucional UAEH. <https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/index.html>.
- Santos-Zea, L., Leal-Díaz, A. M., Jacobo-Velázquez, D. A., Rodríguez-Rodríguez, J., García-Lara, S., & Gutiérrez-Urbe, J. A. (2016). Characterization of concentrated agave saps and storage effects on browning, antioxidant capacity and amino acid content. *Journal of Food Composition and Analysis*, 45, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.10.005>
- Santos-Zea, L., María Leal-Díaz, A., Cortés-Ceballos, E., & Alejandra Gutiérrez-Urbe, J. (2012). Agave (*Agave* spp.) and its Traditional Products as a Source of Bioactive Compounds. *Current Bioactive Compounds*, 8(3), <http://dx.doi.org/10.2174/157340712802762410>.
- Vela, E. (2024). El mito del origen del maguey. *Arqueología mexicana*. <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/el-mito-del-origen-del-maguey>.



VOCES Y DIÁLOGOS DIVERGENTES





La descentralización en la producción del conocimiento biotecnológico en el sector farmacéutico: el papel de los actores locales

Talia Rebeca Haro Barón¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias Políticas y Sociales

*Autor de correspondencia: rebeca.haro@gmail.com

Palabras clave:

centros de investigación,
descentralización,
producción del conocimiento,
sector farmacéutico.

Resumen

En el siglo XXI, la producción en el conocimiento biotecnológico en el sector farmacéutico se ha descentralizado, lo cual ha conferido un papel más relevante a las unidades locales. Dichas unidades locales son un entramado de actores, entre los cuales se incluye la burocracia local, los centros de investigación y las universidades. Este ensayo esboza el papel de dichos actores, así como aquellos mecanismos con los que los centros de investigación cuentan con el fin de producir a gran escala dicho conocimiento.

Introducción

En el último medio siglo, un cambio en la producción del conocimiento biotecnológico en el sector farmacéutico ha ocurrido, en el que la empresa multinacional dejó de ser el actor principal (Block, 2016). Así, ha ocurrido una descentralización en dicha producción, en la cual múltiples actores participan, tal como las universidades, los centros de investigación, los institutos de salud pública y las empresas (Block, 2016). Por un lado, la tercera revolución farmacéutica ocurrió con el nacimiento de la biotecnología en Estados Unidos (EE. UU.) a través de la descentralización de dicha producción. Luego dicha producción se extendió a los países del Sur Global a través de diferentes mecanismos de propiedad, tales como las licencias de uso exclusivo y no exclusivo, la transferencia de tecnología, y los derechos de propiedad intelectual. Este ensayo tiene como objetivo hacer una revisión sobre dicho entramado, lo cual es importante en términos económicos y salud pública. Dicha revisión es de utilidad para analizar las oportunidades de los

Enfoques Transdisciplinarios:
Ciencia y Sociedad, 3(1), 251-259.
ISSN: 3061-709X. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14713838>

Recibido: 03 octubre 2024
Revisado: 21 de noviembre 2024
Aceptado: 12 de diciembre 2024
Publicado: 21 de enero 2025



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



centros de investigación en dicha producción, tal como del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ).

La creación de la biotecnología en el sector farmacéutico en Estados Unidos: la descentralización y los actores locales

En la segunda mitad del siglo XX, la administración central en EE. UU. impulsó la tercera revolución en el sector farmacéutico, es decir, la biotecnológica (Mazzucato, 2018). Dicho impulso fue a través de dos elementos: mayor financiamiento, y un marco de gobernanza en términos regulatorios y jurídicos en el ámbito nacional, con el fin de estimular el escalamiento tecnológico. En primer lugar, el sector salud fue el segundo rubro con mayor financiamiento, después del militar, luego de la Segunda Guerra Mundial. En segundo lugar, un marco de gobernanza fue instrumentado en la década de los ochenta, el cual estuvo constituido por: la regulación expedita para que los biotecnológicos accedieran al mercado, mayor protección a los propietarios de los derechos de propiedad intelectual, la obligación de las universidades y los centros de investigación de transferir tecnología a las empresas, entre otros (Mazzucato, 2018). En el ámbito federal, diferentes entidades fueron partícipes de dicho marco, tal como la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés), con el fin de impulsar el escalamiento tecnológico.

Dicho marco de gobernanza definió las normas en torno a la producción, la propiedad y el acceso al conocimiento (Haunss, 2013). Dicho marco ha impulsado la participación de diferentes actores en el ámbito internacional, nacional y subnacional y, por otro lado, conflictos entre diferentes actores derivados de las normas que conforman dicho marco. En primer lugar, dicho marco ha incentivado la participación de los actores en el ámbito subnacional en dicha producción. Así, las universidades y los centros de investigación que están apoyados con recursos federales se han convertido en uno de los elementos esenciales, puesto que están obligados a transferir dicho conocimiento a las empresas para su comercialización (Jeske, 2020). Dicha norma ha promovido la descentralización de la producción del conocimiento. En dicho proceso, los gobiernos locales han sido esenciales para la formación de recursos humanos, así como en la provisión de infraestructura. En segundo lugar, los derechos de propiedad intelectual que es uno de los elementos de dicho marco, ha sido conflictivo en las últimas décadas, lo cual ha sido acentuado por su incorporación a los tratados de libre comercio regionales y multilaterales (Gallagher, 2008; Shadlen, 2008). Dichos conflictos han sido palpables en las campañas de acceso a medicamentos con el fin de liberar patentes, en las cuales ha sido subyacente una solicitud de mecanismos alternativos de propiedad para expandir dicha producción, y por tanto asegurar el acceso.



Dicho marco de gobernanza ha tenido como consecuencia el escalamiento tecnológico, que ha conducido a la producción de medicamentos innovadores, entre los que se encuentran los biológicos y químicos. Dichos medicamentos han sido prescritos para diferentes padecimientos, tales como el VIH, el cáncer y la diabetes. Dicha producción ha estado confrontada ante la necesidad de acceso durante las emergencias sanitarias. La primera emergencia fue la ocurrida durante la epidemia de VIH a finales del siglo XX. En países del Sur Global, tal como Brasil, India y Sudáfrica, dicha epidemia condujo a un conflicto respecto al mecanismo de propiedad subyacente a dicha producción, es decir, a los derechos de propiedad intelectual. Dichos países propugnaron por mecanismos alternativos de propiedad, los cuales estuvieran basados en el acceso democrático al conocimiento. A continuación, se hace una revisión de la expansión de dichos mecanismos en el Sur Global, y cómo los actores locales han participado en dicha producción.

La participación del Sur Global en la producción del conocimiento en el sector biotecnológico en el sector farmacéutico

En el siglo XXI, los gobiernos subnacionales han estado altamente influidos por las influencias transfronterizas (Agranoff, 2022). Los gobiernos subnacionales se refieren a las entidades federativas, las regiones y los municipios (Agranoff, 2022). Por otro lado, dichos gobiernos cuentan con capacidades, las cuales se refieren a “garantizar la seguridad interna y ‘producir’ bienestar, dada la división funcional de la actividad estatal” (Del Tredici et al., 2024, p. 220). Así, dichas capacidades tienen efectos en los indicadores de progreso humano, tales como la educación, la salud o la pobreza. Debe reconocerse que en el siglo XXI el desarrollo ya no sólo está relacionado con las capacidades nacionales, sino con las de las unidades subnacionales.

Debe recordarse las grandes diferencias en el nivel de industrialización entre los estados del norte y los del sur de México. En este sentido, seis estados principalmente ubicados en la frontera norte (Chihuahua, Coahuila, Baja California, Nuevo León, Tamaulipas y Guanajuato) contribuyeron con el 59% al valor total de las exportaciones en el segundo trimestre del 2024 (Zepeda, 2024). En el mismo período, las entidades federativas que contribuyeron con exportaciones de alta tecnología (es decir, equipo de computación, comunicación, medición y de otros equipos, componentes y accesorios electrónicos) fueron: Chihuahua, Baja California, Jalisco, Tamaulipas, y Nuevo León (Zepeda, 2024). Dichas diferencias en la producción no sólo están relacionadas con la posición geográfica de las entidades federativas, sino también con la instrumentación de políticas específicas por parte de las burocracias locales para la inversión en bienes comunes.



De igual importancia es la ideología de las burocracias locales, la cual decide el tipo de bienes comunes provistos, es decir, si son en salud, capital humano, o ciencia y tecnología (Evans, 1995). Así, la inversión específicamente en capital humano y en ciencia y tecnología ha sido un prerrequisito para el escalamiento tecnológico. Como ejemplo encaminado a dicho fin, se encuentra el Programa “De la Ciencia al Mercado” que es instrumentado por el Fondo de Ciencia y Tecnología del estado de Jalisco. Dicho Programa ha buscado vincular proyectos nacidos en los centros de investigación con el mercado. Este es un ejemplo de cómo la burocracia local puede invertir en bienes comunes con el fin de lograr el escalamiento tecnológico.

La labor de la burocracia local cobra especial relevancia en los países bajo un régimen federalista, tal como Estados Unidos, México o Brasil (Bennouna et al., 2021). Un caso paradigmático en el sector farmacéutico fue en Brasil durante la pandemia del SARS-CoV-2. Ante la renuencia del entonces presidente Jair Bolsonaro para el suministro de la vacuna, el gobernador de Sao Paulo, Joao Doria, estableció relaciones diplomáticas con la República Popular de China (RP China). Dicha relación tuvo como resultado la alianza entre el Instituto Butantan, un centro de investigación público localizado en Sao Paulo y la empresa farmacéutica Sinovac de la RP China. Dicha alianza produjo un acuerdo no sólo para el suministro inicial de 43 millones de vacunas al estado de Sao Paulo (Roveri et al., s. f.), sino también para que el Instituto Butantan fabricara dicha vacuna a partir de transferencia de tecnología. Dicha alianza además incluyó que se llevaran a cabo la fase 3 de los ensayos clínicos en Brasil, el registro de la vacuna por parte del Instituto Butantan ante la autoridad regulatoria nacional (Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria, ANVISA) y el comienzo de la producción (Roveri et al., s. f.). El caso del Instituto Butantan, así como del estado de Sao Paulo en Brasil, son un ejemplo de la labor que puede ser llevada a cabo por las entidades locales —tanto la burocracia local como los centros de investigación—, especialmente durante una emergencia sanitaria.

Lo anterior da pauta para reflexionar el papel en la producción del conocimiento no sólo de las burocracias locales, sino también de las universidades y los institutos de investigación. Durante la pandemia del SARS-CoV-2, numerosos centros de investigación y universidades propusieron distintos mecanismos, con el fin de que se pudieran multiplicar los productores de tecnologías médicas (principalmente vacunas). Dichos mecanismos han incluido los derechos de propiedad intelectual, las licencias de uso exclusivo, las licencias de uso no exclusivo, así como la mentoría activa para transferir tecnología. El uso de dichos mecanismos ha abierto interrogantes no sólo en términos de qué mecanismo es más propicio para promover el escalamiento tecnológico, sino en casos de emergencia sanitaria cuál de ellos es el más eficaz para proteger la salud pública. En el caso de los derechos de propiedad



intelectual, las universidades y los centros de investigación han sido proclives a solicitar patentes sobre las invenciones que realizan. En México, la Universidad Nacional Autónoma de México es la universidad con mayor número de patentes en el ámbito nacional, con 173 patentes obtenidas en los últimos cinco años (Villaseñor, 2024). No obstante, durante emergencias sanitarias, múltiples cuestionamientos han surgido sobre las patentes en tecnologías médicas, debido a sus implicaciones respecto a la salud pública. Dichos cuestionamientos han provenido de organizaciones no gubernamentales y de países del Sur Global, tal como India o Sudáfrica.

Por otro lado, los institutos de investigación y universidades han propuesto otro mecanismo, que son las licencias de uso exclusiva a tecnologías que se encuentran bajo patente. Un ejemplo fue la Escuela de Medicina Icahn en Monte Sinai, en Nueva York, que desarrolló una vacuna basada en la plataforma del vector, la cual fue patentada (Mount Sinai, 2021). México solicitó una licencia de uso exclusivo sobre dicha tecnología, con el fin de que fuera producida por la empresa mexicana Avimex a cambio de regalías modestas. Dicha vacuna fue titulada como “Patria”, la cual recibió el apoyo de diferentes entidades públicas, tal como el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) y la Agencia Mexicana para la Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID). Dichas entidades estuvieron encargadas tanto del financiamiento como de diferentes etapas de la producción, tal como los ensayos clínicos, la autorización sanitaria, así como la producción a gran escala (Covarrubias, 2024; López, 2024). Asimismo, dichas vacunas serán distribuidas por las instituciones sanitarias nacionales, lo que significa que serán adquiridas por parte del gobierno y no tendrán que competir en el libre mercado con otras compañías.

Bajo una visión distinta, durante la pandemia del SARS-CoV-2 ciertas universidades y centros de investigación tuvieron una aproximación de acceso abierto al conocimiento. En otras palabras, sus innovaciones no fueron patentadas, con el fin de que pudieran ser producidas a gran escala por otros actores a cambio de regalías modestas. Uno de dichos casos fue el del Hospital de Niños de Texas y el Colegio Baylor de Medicina, ambos en Texas. Ambas instituciones desarrollaron una vacuna, la cual no fue patentada, por lo que cualquier empresa en el mundo podría producir dicha tecnología (Contreras & Shadlen, 2024). Los científicos que crearon dicha vacuna, Peter Hotez y María Elena Botazzi, fueron nominados al Premio Nobel de la Paz en 2022. Así, fueron producidas 100 millones de dosis de dicha vacuna por empresas en Indonesia e India (Contreras & Shadlen, 2024).

Por otro lado, no sólo es que dicha producción sea licenciada, sino también es necesaria una activa mentoría con el fin de transferir el know-how de la producción,



es decir, se requiere mentoría en la transferencia de tecnología. Uno de los casos exitosos en ello fue la producción a gran escala de la vacuna basada en el vector viral que se creó en la Universidad de Oxford. Dicha Universidad patentó dicha tecnología y ofreció una licencia exclusiva en dicha producción a la empresa farmacéutica AstraZeneca, a cambio del pago de regalías (Contreras & Shadlen, 2024). Esto significó que ninguna otra compañía podría producir dicha tecnología sin la autorización de AstraZeneca. No obstante, la Universidad de Oxford realizó la transferencia de tecnología a AstraZeneca, y a su vez, dicha compañía hizo contactos con 12 empresas, con el fin de manufacturar dicha vacuna. Dicha red de colaboradores se encontraba en Asia (República Popular de China, India,¹ Corea del Sur, Tailandia y Japón), América Latina (Argentina y Brasil), Australia, Bélgica, Holanda y Reino Unido (Contreras & Shadlen, 2024). Adicionalmente, había empresas en otros países que fueron entrenadas para la etapa final del “relleno y terminado”, como México (Contreras & Shadlen, 2024). Dicha red fue exitosa, puesto que alcanzó la producción de 3096 millones de dosis. Así, el éxito en dicha producción requirió una activa mentoría para la transferencia de tecnología por parte de los centros de investigación y las universidades.

En México, diferentes iniciativas han surgido por parte de las universidades y los centros de investigación, con el fin de transferir tecnología a las empresas y viceversa. Por ejemplo, en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto de Biotecnología transfirió a la empresa Liomont el conocimiento en la producción de un biomedicamento prescrito para el asma (Villaseñor, 2024). Por otro lado, en 2023 el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y el Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición “Salvador Zubirán” acordaron con la empresa india ImmunoAct sobre la transferencia de tecnología en el proceso de implementar terapias de células T con receptores de antígeno quimérico (CAR-T) (Secretaría de Relaciones Exteriores, 2023). Dicho tratamiento está basado en que se colectan las células del paciente y se modifican en el laboratorio para matar selectivamente las células cancerígenas (Chakraborty, 2024). Dichas terapias tienen como objetivo aumentar la efectividad en el tratamiento de distintos tipos de cáncer. Este caso es de especial atención, puesto que la transferencia proviene de una empresa hacia institutos públicos de investigación en México.

Conclusiones

Los casos precedentes demuestran la importancia de las unidades locales en la producción del conocimiento, lo cual incluye tanto a la burocracia local como a los centros de investigación y universidades. Por un lado, la labor de la burocracia es

¹ Entre ellos se encontró el Instituto Serum de India, el cual es el mayor productor de vacunas medido en volumen en el ámbito mundial (Contreras & Shadlen, 2024)



la inversión en bienes comunes, tal como en recursos humanos, infraestructura y salud. Por otro lado, los centros de investigación incentivan la producción a partir de instrumentar ciertos mecanismos, tal como los derechos de propiedad intelectual, las licencias de uso exclusivo y de uso no exclusivo o la transferencia de tecnología. La reflexión en dichos elementos es útil con el fin de contribuir a la labor del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ).

El CIATEJ cuenta con una línea de investigación en Biotecnología Médica y Farmacéutica, por lo que la anterior reflexión plantea pautas para la expansión de su labor. Por un lado, dicho Centro ha desarrollado proyectos relacionados con mejorar las vacunas contra la tuberculosis y la influenza; la evaluación de la seguridad y la eficacia *in vitro* e *in vivo*; así como el desarrollo de terapias celulares para el tratamiento de enfermedades crónico degenerativas (CIATEJ, s. f.). Dicha labor puede ser ampliada a través del uso de la extensa red de colaboradores nacionales e internacionales, tal como la Secretaría de Salud de Jalisco, el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) y el Instituto Oswaldo Fiocruz en Brasil.

Por un lado, se debe recordar que el Instituto Fiocruz, parte del Ministerio de Salud, desempeña una labor esencial en el sector farmacéutico en América Latina. Esto es debido a que es un instituto público que produce vacunas (por ejemplo, para la fiebre amarilla, la influenza tipo B, la meningitis A y C, la poliomielitis, y la triple vírica), las cuales son utilizadas en los planes de inmunización del Ministerio de Salud en Brasil y en los programas de precalificación de la Organización Panamericana de la Salud (OPS). Se debe enfatizar que el Instituto Fiocruz pertenece al Ministerio de Salud, y por tanto, su producción está determinada por las necesidades de salud y no económicas. Dicho Instituto propone la colaboración con empresas y universidades en el extranjero a partir de tres mecanismos: los acuerdos de transferencia de tecnología; acuerdos de desarrollo conjunto; y los acuerdos de colaboración para la investigación, el desarrollo, y la innovación.

Dichos mecanismos que son propuestos por Fiocruz, podrían ser aprovechados por el CIATEJ como un área para desarrollar ciertas líneas terapéuticas prioritarias. El establecimiento de dichas prioridades sería a partir de la colaboración con la Secretaría de Salud de Jalisco, con el fin de cubrir las necesidades de la población en Jalisco. La selección de dichas prioridades sentaría las bases para los acuerdos negociados con la Fiocruz. Dicha articulación se encontraría en consonancia con el derecho universal al conocimiento, que es contrario al modelo propuesto por los derechos de propiedad intelectual basado en el mercado.



Referencias

- Agranoff, R. (2022). Globalization and Subnational Governments. En A. Farazmand (ed.), *Global Encyclopedia of Public Administration, Public Policy, and Governance* (pp. 5523-5535). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66252-3_1173
- Bennouna, C., Giraudy, A., Moncada, E., Rios, E., Snyder, R., & Testa, P. (2021). Pandemic Policymaking in Presidential Federations: Explaining Subnational Responses to Covid-19 in Brazil, Mexico, and the United States. *Publius: The Journal of Federalism*, 51(4), 570-600. <https://doi.org/10.1093/publius/pjab025>
- Block, F. (2016). Innovation and the Invisible Hand of Government. En *State of Innovation. The US Government's Role in Technology Development* (pp. 1-25). Routledge.
- Chakraborty, R. (2024, febrero 8). 'First' patient free of cancer: Indigenous CAR-T cell therapy brings treatment cost down from Rs 4 crore to Rs 40 lakh. *Indian Express*. <https://indianexpress.com/article/cities/mumbai/indigenous-car-t-cell-therapy-now-available-for-commercial-use-9147148/>
- Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. (s. f.). *Biotecnología Médica y Farmacéutica*. Recuperado 12 de diciembre de 2024, de <https://ciatej.mx/investigacion/biotecnologia-medica>
- Contreras, J. L., & Shadlen, K. C. (2024). Contrasting academic approaches to COVID-19 vaccine production and distribution: What can the Oxford and Texas experiences teach us about pandemic response? *Health Affairs Scholar*, 2(2), qxae012. <https://doi.org/10.1093/haschl/qxae012>
- Covarrubias, S. (2024, junio 7). *Vacuna mexicana Patria es segura y eficaz; cuenta con autorización sanitaria y será producida en planta de clase mundial certificada por Cofepris*. Conahcyt. <https://conahcyt.mx/vacuna-mexicana-patria-es-segura-y-eficaz-cuenta-con-autorizacion-sanitaria-y-sera-producida-en-planta-de-clase-mundial-certificada-por-cofepris/>
- Evans, P. (1995). *Embedded Autonomy. States and Industrial Transformation*. Princeton University Press.
- Gallagher, K. P. (2008). Trading away the ladder? Trade politics and Economic Development in the Americas. *New Political Economy*, 13(1), 37-59. <https://doi.org/10.1080/13563460701859686>
- Haro T. R. (2024, marzo 23). México y la transferencia de tecnologías médicas. *La Silla Rota*. <https://lasillarota.com/opinion/columnas/2024/3/23/mexico-la-transferencia-de-tecnologias-medicas-475055.html>
- Haunss, S. (2013). *Conflicts in the Knowledge Society. The Contentious Politics of Intellectual Property*. Cambridge University Press.



- Jeske, M. (2020). Lessons from Theranos: Changing Narratives of Individual Ethics in Science and Engineering. *Engaging Science, Technology, and Society*, 6, 306-311. <https://doi.org/10.17351/ests2020.411>
- López, A. I. (2024, febrero 15). Lo que hay que saber de Patria, la vacuna mexicana contra covid-19. *El País México*. <https://elpais.com/mexico/2024-02-15/lo-que-hay-que-saber-de-patria-la-vacuna-mexicana-contra-covid-19.html>
- Mazzucato, M. (2018). *The Value of Everything: Making and Taking in the Global Economy*. Allen Lane.
- Mount Sinai. (2021). *Mount Sinai Develops a Safe, Low-Cost COVID-19 Vaccine That Could Help Low- and Middle-Income Countries*. Mount Sinai Health System. <https://www.mountsinai.org/about/newsroom/2021/mount-sinai-develops-a-safe-low-cost-covid19-vaccine-that-could-help-low-and-middle-income-countries>
- Roveri, E., Falcao, M., & Navarrete, A. C. (s. f.). *The experience of Brazilian public laboratories in the development and production of vaccines against Covid-19*. Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor. https://idec.org.br/sites/default/files/innovation_as_a_public_strategy.pdf
- Secretaría de Relaciones Exteriores. (2023, septiembre 1). *Quinto Informe de Labores. Secretaría de Relaciones Exteriores*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/852203/5_InformeLabores_Secretari_a_de_Relaciones_Exteriores_Web.pdf
- Shadlen, K. (2008). Globalisation, power and integration: The Political Economy of Regional and Bilateral Trade Agreements in the Americas. *The Journal of Development Studies*, 44(1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/13562570701722089>
- Villaseñor, A. (2024, septiembre 30). UNAM obtuvo 173 patentes de tecnología en los últimos cinco años. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/noticia/2024/09/30/sociedad/la-unam-obtuvo-173-patentes-de-tecnologia-en-los-ultimos-cinco-anos-3659>
- Zepeda, C. (2024, septiembre 30). Mantienen estados del norte liderazgo en exportaciones. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/noticia/2024/09/30/economia/mantienen-estados-del-norte-liderazgo-en-exportaciones-7254>







Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

