

ENFOQUES

TRANSDISCIPLINARIOS: CIENCIA Y SOCIEDAD

Número especial: Fuentes alternativas de ingredientes funcionales
iberoamericanos para una alimentación sostenible



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación







ENFOQUES TRANSDISCIPLINARIOS: CIENCIA Y SOCIEDAD, volumen 4, no. 1, enero – junio 2026, 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://revistaenfoques.ciatej.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. Reponsable 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, enero de 2026.



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 COORDINADORAS

Dra. Anne Christine Gschaedler Mathis
agschaedler@ciatej.mx

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

EDITORES INVITADOS DE NÚMERO ESPECIAL

Dra. Judith Esmeralda Urías Silvas
jurias@ciatej.mx

Dr. Diego Armando Luna Vital
dieluna@tec.mx

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

Tecnología Alimentaria

Dra. Judith Esmeralda Urías Silvas
jurias@ciatej.mx

Dra. Elba Montserrat Alcázar Valle
ealcazar@ciatej.mx

Tecnología Ambiental

MC. Leonel Hernández Mena
lhernandez@ciatej.mx

Biotechnología Industrial

Dra. Rosa María Camacho Ruíz
rcamacho@ciatej.mx

Biotechnología Vegetal

Dra. Soledad García Morales
smorales@ciatej.mx

Dr. Yair Romero Romero
yromero@ciatej.mx

Biotechnología 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@ciesas.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

mpsdaids@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

EDITORES(AS) ASOCIADOS(AS) INTERNACIONALES

Universidad Autónoma de Madrid

Dr. Miguel Rebollo

miguel.rebollo@uam.es

Centro de Genómica Nutricional Agroacuícola

Dr. Mauricio Opazo Navarrete

mauricio.opazo@cgna.cl

Dr. César Burgos

cesar.burgos@cgna.cl

Universidad de Illinois

Dra. Elvira de Mejía

edemejia@illinois.edu

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 **Producción de ramnolípidos y otros metabolitos secundarios por *Pseudomonas aeruginosa* en México: del matraz a la industria y su potencial en biorremediación**
Gloria Soberón-Chávez, Carolina Calderón-Chiu, Uriel Gutiérrez-Gómez



Alimentación, salud y medioambiente

- 31 **¿En Guadalajara gusta más el yogurt con grasa o sin grasa? Impacto de la sensibilidad gustativa**
Andrea Berenice De la Cruz Pérez, Paulina Bouchan Torres, Socorro J. Villanueva Rodríguez
- 41 ***Cannabis*: de la medicina tradicional en México a fuente de moléculas bioactivas**
Valentina Rueda Barrios, Luis Ángel Mendoza Torres, Silvia Mariela Montilla Fonseca, Irma Cruz Solís
- 55 **Cáncer de pulmón en México: retos del sistema de salud pública y oportunidades en la biología molecular**
Valentina Rueda Barrios, Luis Ángel Mendoza Torres, Silvia Mariela Montilla Fonseca, Irma Cruz Solís



Fuentes alternativas de ingredientes funcionales iberoamericanos para una alimentación sostenible

- 75 **Contenido de kaempferol en tejidos de huauzontle cultivado bajo condiciones de salinidad por NaCl**
Jeanette Guadalupe Cárdenas-Valdovinos, Eréndira Esmeralda Hernández-Andrade, César Omar Montoya-García
- 87 **Antinutrientes: lectinas y fenoles totales en *Phaseolus vulgaris*, *Cicer arietinum* y *Prosopis laevigata*. Un estudio comparativo**
Teresa Susana Herrera Flores, María Guadalupe Moreno Contreras, Eva Marcela Licea de Anda, Alda Alejandra Arratia Castro
- 105 **Las frutas y hortalizas que deberían correr por las venas mexicanas**
Alicia Paulina Cárdenas-Castro, Sonia G. Sáyago-Ayerdi, Jorge Alberto Sánchez-Burgos, Nuria Elizabeth Rocha-Guzmán
- 119 **Relevancia estructural y funcional de las globulinas 11S de fuentes vegetales: un enfoque para la alimentación sostenible**
Jesús Eduardo Pizano-Galvez, Juan Alberto Osuna-Castro, Judith Esmeralda Urías-Silvas
- 145 **Tortillas de maíz azul fortificadas con soya texturizada: impacto en el contenido proteico y capacidad antioxidante**
Liliana León López, Barbara Raquel Martínez Valenzuela, Luis Martín Sánchez Magaña, Saraid Mora Rochin, Jesús Aguayo Rojas, Cuauhtémoc Reyes Moreno, Claudia del Rosario León Sicairos
- 163 **Desarrollo de alimentos funcionales con probióticos: el papel de las levaduras**
Edgar Illescas-Aparicio, Montserrat Alcázar-Valle, Anne Gschaedler, Dulce Velásquez-Reyes, Eugenia Lugo Cervantes
- 177 **Efecto del tiempo de hidrólisis enzimática en garbanzo (*Cicer arietinum* L.) Desi rojo subutilizado selenizado sobre la liberación de compuestos antioxidantes**
A. Keila Milán-Noris, Esmeralda Mascareño-Montoya, Evelia M. Milán-Noris, Eslim S. Sandoval-Sicairos, Álvaro Montoya-Rodríguez, Daniela Guardado-Félix
- 193 **La nueva generación de tortillas: sabor, nutrición y propiedades saludables**
Kendra Baldenebro-Ojeda, Fedra-Carolina López-Villa, Jorge Milán-Carrillo, Noé Ontiveros-Apodaca, Edith-Oliva Cuevas-Rodríguez
- 215 **Caracterización nutricional de semillas de la milpa Amuzga (frijol, maíz y calabaza)**
David Fonseca-Hernández, Ramón Efrén Espinoza-Sosa, Soledad García-Morales, Jhony Navat Enríquez-Vara, David Sánchez-Sánchez, Germán Bautista-García, Jesús Manuel-Mancillas Paredes, Luis Mojica
- 231 **Formulación de harinas funcionales a partir de semillas de la milpa para su aplicación en un modelo de panificación**
Jesús Pedro Paniagua Rivas, José Eduardo Michel Páez, Jonhatan Contreras-Negrete, Filiberto Ramírez, Luis Mojica, Montserrat Alcázar-Valle



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 transdisciplinarios sobre los sistemas agroalimentarios, la salud, el medio ambiente, la tecnología y las ciencias sociales.

Este número cuenta con las secciones tradicionales de la revista, que incluyen Desarrollo y procesos científicos y tecnológicos; Alimentación, salud y medioambiente y Sociedad y Sistemas agroalimentarios, además de una edición especial dedicada a **Fuentes alternativas de ingredientes funcionales iberoamericanos para una alimentación sostenible**, que busca promover la divulgación del potencial de cultivos alternativos y de otras fuentes de proteínas, lípidos y componentes bioactivos en Iberoamérica. Además de resaltar estrategias de valoración de semillas y otros materiales subutilizados que promuevan la seguridad alimentaria en la región.

En las secciones tradicionales se explora el Cannabis, permitiéndonos hacer un recorrido desde la medicina tradicional en México hasta el desarrollo de ingredientes y alimentos funcionales, tal es el caso de la producción de ramnolípidos y otros metabolitos secundarios por *Pseudomonas aeruginosa*. Por otro lado, se presenta una evaluación del impacto de la sensibilidad gustativa en el caso particular de Jalisco, donde se analiza si gusta más el yogur con o sin grasa. Asimismo, se aborda la temática del cáncer de pulmón en México: los retos del sistema de salud pública y las oportunidades en la biología molecular.

En la sección del número especial, dedicada a las fuentes alternativas de ingredientes funcionales iberoamericanos para una alimentación sostenible, se enfatiza la revalorización de cultivos ancestrales como el huazontle, componentes de la milpa amuzga, el frijol, el maíz y la calabaza, el garbanzo y el mezquite blanco, así como de frutas y hortalizas mexicanas.

En el caso del huazontle, se evalúa el efecto de la salinidad en las condiciones de cultivo sobre los niveles de kaempferol. Por otro lado, el uso de especies vegetales en la alimentación requiere evaluar los antinutrientes que podrían presentar. En este punto, se presenta el estudio que permite conocer las lectinas y fenoles totales presentes en las especies de semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris*), garbanzo (*Cicer arietinum*) y mezquite blanco (*Prosopis laevigata*). En cuanto a frutas y hortalizas, se presenta un análisis de los cultivos que deberían correr por las venas de los mexicanos. Por otro lado, se presenta el análisis de la relevancia estructural y funcional de las proteínas

vegetales; en este caso en particular, se aborda la globulina 11S de semillas como garbanzo, amaranto y chía, entre otras, y se analizan sus características y propiedades desde un enfoque de alimentación sostenible.

En cuanto a la aplicación de las fuentes alternativas de ingredientes funcionales iberoamericanos en el desarrollo de alimentos, se aborda el desarrollo de tortillas de maíz azul fortificadas con soya texturizada, poniendo énfasis en el contenido proteico y la capacidad antioxidante, así como también se presenta la evaluación del papel de la incorporación de levaduras como probióticos en el desarrollo de alimentos funcionales. Asimismo, se presenta la evaluación del efecto del tiempo de hidrólisis enzimática en garbanzo subutilizado selenizado sobre la liberación de compuestos antioxidantes.

Finalmente, este número especial culmina abordando el tema de la nueva generación de tortillas, así como la formulación de harinas funcionales con semillas de milpa para su aplicación en un modelo de panificación.

La integración de los estudios presentados demuestra que la alimentación depende de una visión multidisciplinaria. Desde la identificación de moléculas bioactivas y su caracterización hasta el desarrollo de alimentos, permitiendo resaltar la gran biodiversidad iberoamericana.

Se extiende un sincero agradecimiento a cada una de las personas que participaron para que este número especial se concretara, e invitamos a la comunidad a explorarlo, con el fin de fomentar una verdadera apropiación social del conocimiento sobre nuestros recursos y abrir el panorama de la riqueza de cultivos alternativos que pueden utilizarse para promover una alimentación sostenible.

Dra. Judith Esmeralda Urias Silvas

Dr. Diego Armando Luna Vital

Editores Invitados







DESARROLLO Y PROCESOS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS





Producción de ramnolípidos y otros metabolitos secundarios por *Pseudomonas aeruginosa* en México: del matraz a la industria y su potencial en biorremediación

Production of rhamnolipids and other secondary metabolites by *Pseudomonas aeruginosa* in Mexico: from the flask to the industry and its potential in bioremediation

Gloria Soberón-Chávez¹, Carolina Calderón-Chiu², Uriel Gutiérrez-Gómez^{3*}

¹Instituto de Investigaciones Biomédicas de la Universidad Nacional Autónoma de México.

²Academia de Ingeniería en Industrias Alimentarias del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, Teziutlán, 73960, Puebla, Mexico.

³Instituto de Farmacobiología de la Universidad de la Cañada, Oaxaca, México.

*Autor de correspondencia: uriel@unca.edu.mx

Palabras clave:

biosurfactante, glicolípido, metabolitos secundarios bacterianos, polihidroxicanoatos, piocianina, aislados bacterianos ambientales.

Keywords:

biosurfactant, glycolipid, bacterial secondary metabolites, polyhydroxyalkanoates, pyocyanin, environmental bacterial isolates.

Resumen

Los ramnolípidos (RLs) son glicolípidos producidos principalmente por cepas de *Pseudomonas aeruginosa*, que han sido ampliamente utilizados en la biorremediación de hidrocarburos y en la formulación de productos de cuidado personal. Los RLs presentan baja toxicidad y alta biodegradabilidad en comparación con los surfactantes sintéticos; por tanto, se consideran la próxima generación de biosurfactantes. Sus aplicaciones se extienden a las industrias farmacéuticas, cosméticas y alimentarias gracias a sus propiedades antifúngicas, antimicrobianas e inmunoestimulantes. *P. aeruginosa* también produce polihidroxicanoatos y pigmentos como la piocianina, valiosos en la producción de envases y textiles. Sin embargo, la producción de RLs en México ha sido poco explorada, principalmente debido a la falta de información sobre sus aplicaciones y el costo de su producción. Este artículo busca destacar los avances tecnológicos en México relacionados con la producción de RLs y de otros compuestos por *P. aeruginosa*, y así promover su escalamiento industrial en el país.

Abstract

Rhamnolipids (RLs) are glycolipids produced mainly by strains of *Pseudomonas aeruginosa*. They are increasingly utilized in hydrocarbon bioremediation and the formulation of personal care products. RLs are known for their low toxicity and high biodegradability compared to synthetic surfactants, making them a promising next-generation biosurfactant. Their applications extend to the pharmaceutical, cosmetic, and food industries due to their antifungal, antimicrobial, and immunostimulant properties. In addition to producing RLs, *P. aeruginosa* also generates polyhydroxyalkanoates and pigments, such as pyocyanin, which are valuable for creating packaging and textiles. However, the production of RLs in Mexico has been minimally explored, primarily due to a lack of information on their applications and the cost of their production. This article aims to highlight technological advances in Mexico concerning the production of RLs and other compounds by *P. aeruginosa*, with the goal of promoting their industrial scaling in the country.

Recibido: 12 de agosto 2025
Revisado: 08 de diciembre 2025
Aceptado: 30 de diciembre 2025
Publicado: 23 de febrero 2026



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

Los ramnolípidos (RLs) son biosurfactantes producidos principalmente por cepas bacterianas de *Pseudomonas aeruginosa*, los cuales exhiben excelentes características físico-químicas, haciéndolos potencialmente aptos en diversas aplicaciones industriales, tales como la biomédica, farmacéutica, cosmética, alimentaria y por asistir en procesos de biorremediación. Debido a su baja toxicidad y alta capacidad de biodegradación, en comparación con los surfactantes sintéticos, se consideran la próxima generación de biosurfactantes (Soberón-Chávez et al., 2021). Debido a las múltiples y potenciales aplicaciones de estas moléculas, la demanda mundial de RLs se ha incrementado considerablemente. De hecho, la empresa de investigación de mercado y consultoría de gestión *Global Market Insights Inc* ha predicho que el mercado de RLs alcanzará cifras de más de 145 millones de dólares en 2026 (Dittmann et al., 2023).

Sin embargo, las aplicaciones industriales y la comercialización de RLs aún se ven limitadas por la baja producción y por la patogenicidad de *P. aeruginosa*. Por esta razón, alrededor del mundo se han abordado investigaciones enfocadas en encontrar estrategias para mejorar la producción de RLs de forma segura. Estas incluyen la manipulación genética y la obtención de cepas de medios ambientales con capacidad para sobreproducir RLs. En México, el uso de biosurfactantes de tipo RLs para asistir en procesos de biorremediación no ha sido implementado debido a la falta de investigación relacionada con su producción. Por tanto, el objetivo de este artículo es describir las investigaciones científicas realizadas en México acerca de la producción de RLs y otros metabolitos secundarios por bacterias de *P. aeruginosa* con el fin de aumentar el interés en estas moléculas de gran potencial industrial.

Biosurfactantes glicolípidicos (ramnolípidos) y sus aplicaciones

Los RLs fueron descubiertos por primera vez en la bacteria *P. aeruginosa*, aunque también han sido producidos por otros microorganismos de los géneros *Burkholderia*, *Klebsiella*, *Meyerozyma*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Acinetobacter*, *Staphylococcus* y *Achromobacter* y en hongos como *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Agrocybe* y *Candida*. No obstante, *P. aeruginosa* es reconocida como la principal productora de RLs en el mercado mundial, lo que resalta la importancia de este microorganismo a nivel industrial (Soberón-Chávez et al., 2021).

Estructuralmente, los RLs son moléculas formadas por una fracción hidrofílica compuesta por una o dos moléculas de ramnosa (mono- o di-RLs, respectivamente) y por una fracción hidrofóbica compuesta por dos ácidos grasos de longitud variable (Figura 1). Los mono- o di-RLs tienen características surfactantes, pero la presencia de una o dos moléculas de ramnosa les otorga diferentes propiedades físico-químicas (Eslami et al., 2020). Dentro de estas propiedades se incluyen la detergencia,

emulsionante, secuestrador de metales, desemulsificante, humectante, espesante, espumante, entre otros. Todas estas propiedades son asociadas al carácter anfílico de los RLs, que les confieren la capacidad de reducir las tensiones superficiales e interfaciales en fluidos (Sinumvayo, 2015).

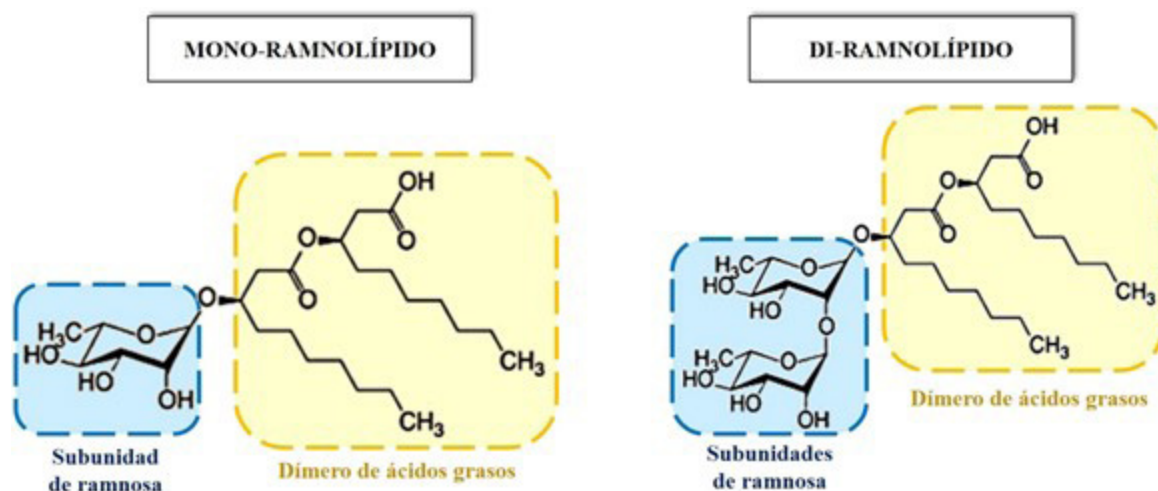


Figura 1. Tipos de ramnolípidos
Fuente: Propia

Por esta razón, los RLs han tenido amplia aplicación en sectores industriales, como el procesamiento de alimentos, la agricultura, la industria farmacéutica y cosmética, así como en aplicaciones médicas (Sinumvayo, 2015; Tiso et al., 2017; Varjani et al., 2021). En la industria alimentaria, los RLs tienen aplicación como conservadores debido a sus propiedades antimicrobianas y agentes emulsionantes, incluso como componentes de nanopartículas cargadas de compuestos bioactivos. De igual forma, los RLs podrían formar parte de estrategias alternativas para reducir o reemplazar los pesticidas convencionales usados en la agricultura, pues tienen el potencial de inhibir plagas (hongos e insectos) en cultivos de importancia agrícola (Sinumvayo, 2015). Sin embargo, la principal aplicación de los RLs ha sido asistir en la degradación de hidrocarburos en procesos de biorremediación.

Uso de RLs en biorremediación de hidrocarburos en México

La contaminación por hidrocarburos es motivo de preocupación social por los efectos nocivos en la salud humana y al medio ambiente (Christova et al., 2019). La remediación, es decir, el proceso para tratar medios contaminados con hidrocarburos, se basa en el uso de agentes químicos, en particular, surfactantes sintéticos. Dichos surfactantes están constituidos por una parte afín al agua (hidrofílica o cabeza) y otra fracción repelente al agua (hidrofóbica o cola) (Zhao et al., 2024). Estos



agentes surfactantes aumentan la solubilidad y la movilidad de los hidrocarburos en agua, lo que facilita su eliminación; por esta razón, su uso ha constituido el método de remediación más eficaz en los últimos años (Zhao et al., 2024). No obstante, el alto costo y los riesgos ambientales ocasionados por surfactantes sintéticos exigen la reevaluación de su uso (Tabla 1), principalmente por los efectos perjudiciales en el ecosistema y la generación de contaminantes secundarios con alta toxicidad (Samuel-Osamoka et al., 2023).

Una de las alternativas para la remoción de los hidrocarburos es la remediación microbiana (biorremediación). La biorremediación utiliza microorganismos (bacterias, algas, hongos) para descomponer, cambiar, eliminar, inmovilizar o desintoxicar diversos contaminantes físicos y químicos del medio ambiente. El uso de microorganismos nativos de ambientes naturales es una gran ventaja, ya que éstos tienen un metabolismo inherentemente adaptado a la interacción con otros organismos o elementos abióticos de un ambiente. La elección del microorganismo para asistir en procesos de biorremediación depende de su capacidad de remoción de contaminantes, sin provocar un efecto negativo sobre el entorno en el que es aplicado.

La implementación de procesos de biorremediación ofrece ventajas adicionales, en las que destacan su rentabilidad, simplicidad y la generación de menos contaminantes secundarios que los surfactantes sintéticos. La producción exacta de contaminantes secundarios producidos por procesos de biorremediación o con los surfactantes sintéticos no es tan fácil de predecir de forma precisa y cuantitativa, lo cual se debe a la complejidad de los ambientes en tratamiento. Sin embargo, las especies químicas secundarias generadas en procesos de biorremediación corresponden a subproductos de vías metabólicas que son capaces de continuar con su catabolismo hacia CO_2 , biomasa o energía. Por el contrario, el metabolismo de surfactantes sintéticos, en muchos casos generan residuos poco aptos para el catabolismo a corto o mediano plazo (Bala et al., 2022).

Tabla 1. Efectos de surfactantes sintéticos sobre ambientes acuáticos y suelo

Ambiente	Efectos abióticos	Efectos bióticos
Acuático	Incremento en la concentración de contaminantes solubles e insolubles en agua	Inhibición de crecimiento de microalgas marinas, plancton y plantas acuáticas
	Eutrofización y adición de fosfatos	Alteraciones en visión de peces y daños en branquias
Acuático	Consumo y agotamiento acelerado de oxígeno disuelto	Disminución de adsorción de oxígeno por organismos acuáticos
		Disminución de velocidad de reproducción e inducción de anomalías congénitas en peces
Suelo	Disminución de retención e infiltración de agua	Reducción de componentes bióticos en ecosistemas del suelo
	Generación de suelos secos	Ralentización en degradación de xenobióticos
	Función de raíz deficiente	
	Crecimiento retardado de plantas	
Suelo	Incremento de salinidad del suelo	

Fuente: Arora et al. (2022)

Lo anterior, destaca el efecto benéfico de implementar procesos de biorremediación en lugar de los métodos convencionales (Tabla 2), ya que además de producir RLs que pueden asistir en la degradación de hidrocarburos aromáticos alifáticos y policíclicos del ambiente, también se estimula el crecimiento de bacterias autóctonas (Oluwaseun et al., 2017; Phulpoto et al., 2022). Los RLs, al igual que los surfactantes sintéticos, reducen la tensión superficial y emulsionan las fracciones hidrofóbicas de los hidrocarburos, lo que conduce a la formación de micelas (Figura 2). Las micelas se forman cuando las partes hidrofílicas del biosurfactante se orientan hacia la parte acuosa del medio, en tanto su parte hidrofóbica o cola se une a los hidrocarburos contaminantes; de tal forma que los biosurfactantes rodean completamente al contaminante hidrofóbico (Chicca et al., 2022; Rezaei & Moghimi, 2024). Esto facilita la adsorción del contaminante en la célula microbiana para su posterior degradación enzimática intra- y extracelular (Sánchez, 2022).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de biorremediación y la remediación tradicional

	Remediación tradicional	Biorremediación
Ventajas	Recomendable para compuestos altamente tóxicos o recalcitrantes Resultados en poco tiempo Gran utilidad en contención inmediata de contaminación Efectividad contra un amplio espectro de contaminantes, incluyendo sustancias no biológicas (metales pesados y material radiactivo).	Menor costo Disrupción mínima de ecosistemas Potencial mínimo de contaminación secundaria Uso de microorganismos capaces de adaptarse a diferentes contaminantes Beneficios ecológicos a largo plazo
Desventajas	Perturbación significativa del ambiente y mayor costo No promueven la restauración ecológica y pueden provocar problemas ambientales a largo plazo.	Proceso relativamente lento Uso para casos leves o menos críticos de contaminación Dependiente de combinación multifactorial de condiciones óptimas para implementación

Fuente: Reynolds (2023)

La efectividad de los RLs en procesos de biorremediación está determinada por parámetros físico-químicos tales como la tensión superficial (26–29 mN/m), índice de emulsificación (E24: 50–85 %), concentración micelar crítica (CMC: 50–200 mg/L), y la capacidad de remoción de hidrocarburos superiores a 50% (Garg et al., 2025; Safari et al., 2023; Zhuang et al., 2022). Por ejemplo, en el caso particular de la remoción de *n*-alcanos (C_{10} - C_{30}), los RLs registran una capacidad de remoción de hidrocarburos del 61%, mientras que los surfactantes químicos presentan un máximo de 18.75% en las mismas condiciones (Zhuang et al., 2022), lo cual destaca la eficacia de los biosurfactantes.

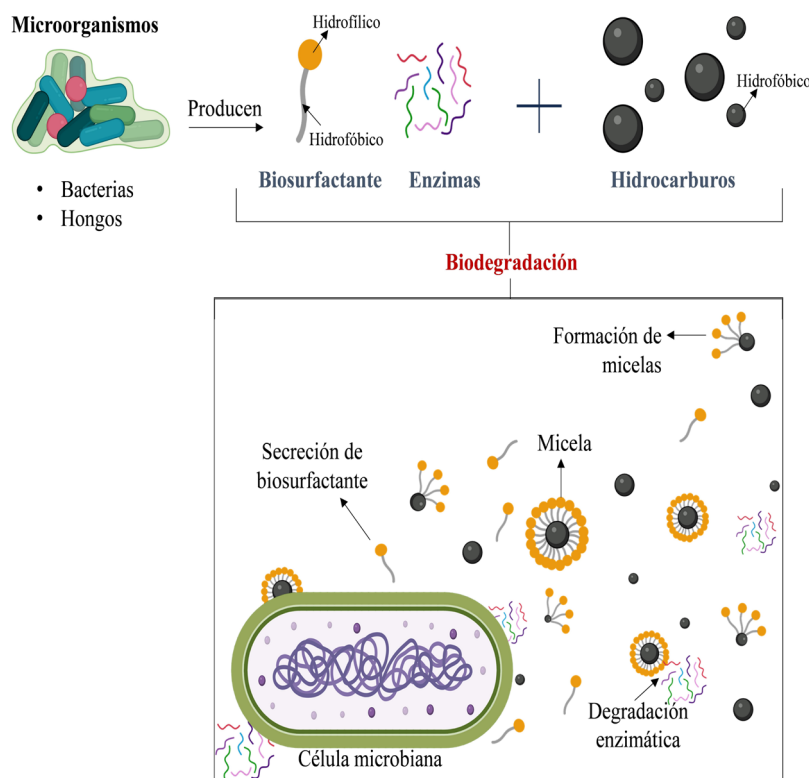


Figura 2. Biodegradación de hidrocarburos asistida por biosurfactantes
Fuente: Adaptada de Sánchez (2022)

En México, Mata-Guadarrama (2022) aisló una cepa de *Pseudomonas sp.* de suelo contaminado por hidrocarburos de fracción pesada con la finalidad de producir RLs para emplearlos en la remoción de hidrocarburos del suelo. De acuerdo con sus hallazgos, esta cepa produjo RLs con la capacidad de formar emulsiones con un índice de emulsificación del 66% en aceites pesados. El estudio evidenció que los RLs mejoraron la eficiencia de remoción de hidrocarburos de fracción pesada del suelo y favorecieron el crecimiento de la población microbiana comparado con la aplicación de surfactantes químicos. Hasta donde se sabe, el uso de RLs para procesos de biorremediación a nivel industrial ha sido poco explorado en México. Sin embargo, la evidencia resalta que el uso de cepas ambientales para producir RLs y asistir en la remoción de contaminantes derivados del petróleo es una alternativa viable a los métodos convencionales de remediación que valdría la pena explorar.

Producción de RLs en México a partir de cepas de *P. aeruginosa* ambientales

En general, la aplicación de los RLs se ha limitado por los altos costos del proceso de fermentación. Factores como el costo de la fuente de carbono y otros nutrientes, así como el método de producción, han restringido su obtención. Para superar estos incon-

venientes, se han realizado estrategias para una producción de RLs más rentable. Estas incluyen el uso de sistemas heterólogos no patógenos como *Pseudomonas putida* KT2440 y el desarrollo de cepas genéticamente modificadas con capacidad de sobreproducir RLs.

En México, un grupo de investigadores, liderados por la Dra. Gloria Soberón Chávez del Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM, realizó una investigación para la producción de RLs en cepas no virulentas de *Pseudomonas* modificadas genéticamente. Estos investigadores obtuvieron la patente (registro MX/a/201/006840) para la producción de RLs en la derivada no virulenta de la cepa de *P. aeruginosa* PA14 (Figura 3), la cual fue otorgada por el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (Gutiérrez-Gómez & Soberón-Chávez, 2024). Esto constituye la primera cepa sobreproductora de RLs en México generada mediante ingeniería genética y con la cual se podría empezar el escalamiento industrial en el país.

La modificación genética de *P. aeruginosa* es un gran avance para la ciencia biotecnológica en México, ya que ha sentado las bases para obtener RLs en mayor proporción y con gran expectativa para extender su uso y aplicación. No obstante, para la construcción de la mutante y la validación de esta, fueron necesarios experimentos complejos y estandarizados que requirieron de tiempo y condiciones experimentales específicas, las cuales podrían no estar disponibles en ciertos grupos de investigación del país. Por esta razón, el aislamiento de *P. aeruginosa* de diversos entornos ambientales (suelo o agua) surge como una alternativa para obtener cepas productoras de RLs.

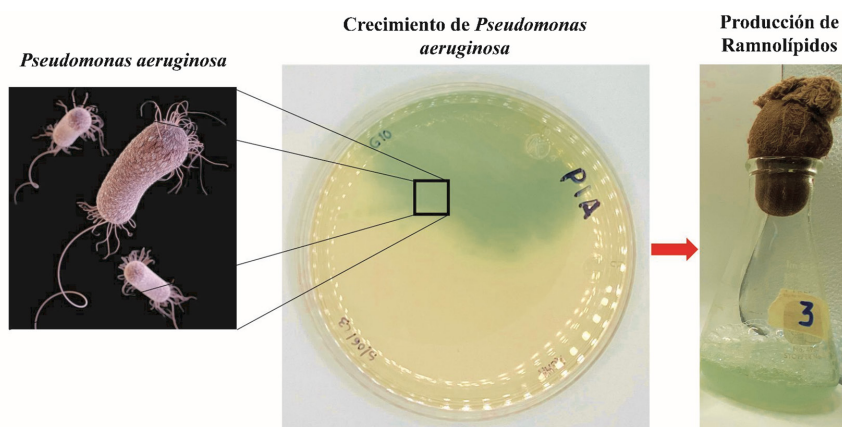


Figura 3. Producción de RLs por *P. aeruginosa*
Fuente: Gutiérrez-Gómez & Soberón-Chávez, 2024

El aislamiento de cepas de *P. aeruginosa* de entornos ambientales, principalmente contaminados con hidrocarburos, abre la posibilidad de usar algunos subproductos de petróleo (el diésel) o aceites comestibles de desecho alimentario como fuentes de carbono, lo que permitiría obtener biosurfactantes de interés industrial a un bajo costo. Esto basado en el hecho de que uno de los principales inconvenientes en



la producción de los RLs es el costo de las fuentes de carbono (glicerol, manitol, fructosa, glucosa, *n*-parafinas, aceites vegetales, entre otros) y de otros nutrientes utilizados en la fermentación, puesto que representan entre el 10 y el 30% del costo total de producción (Cerqueira dos Santos et al., 2024). Sin embargo, el empleo de fuentes de carbono alternativas requiere de procesos de optimización para mejorar la sustentabilidad medioambiental y económica de la producción de RLs.

En México, el aislamiento de cepas de *P. aeruginosa* de dichos hábitats ha tenido particular interés. De hecho, recientemente se identificaron cepas de *P. aeruginosa* aisladas del suelo altamente contaminado con hidrocarburos de la región del valle Tehuacán – Cuicatlán, México (Figura 4). Estas cepas mostraron ser viables para producir RLs usando hexano como fuente de carbono, indicando que se podrían usar subproductos del petróleo para obtener estos compuestos (Huerta-Hernández, 2024). Dichas cepas no solo mostraron capacidad para producir RLs, sino que también pueden producir piocianina (pigmento) en cantidades similares a las de la PAO1 (cepa de *P. aeruginosa* de referencia).

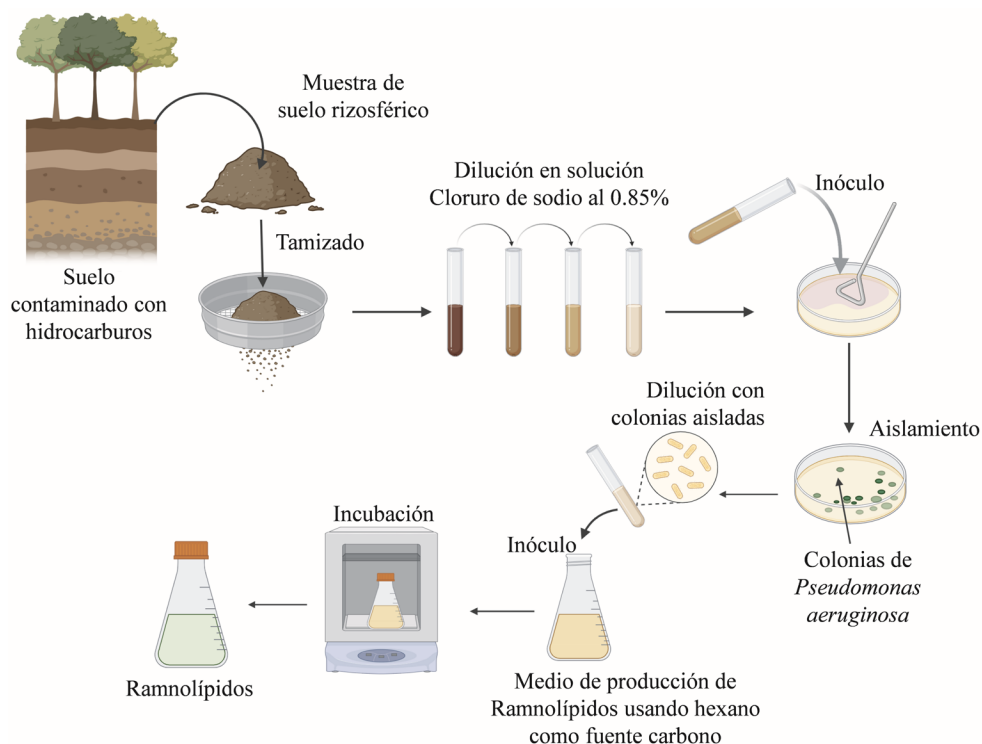


Figura 4. Aislamiento de cepas de *P. aeruginosa* de suelo contaminado con hidrocarburos para la obtención de RLs

Fuente: Propia

Aunque el uso de cepas ambientales es una alternativa para la producción de RLs, preocupaciones referentes a sus factores de virulencia han sido de gran relevancia. Por esta razón, investigaciones recientes, se han enfocado en la inhibición de factores

de virulencia regulados por el sistema sensor de quórum, tales como el uso de ácido galoilquinico (Al-Maddboly et al., 2025) o la harmina (Chen et al., 2024). En tanto, otros grupos de investigación han explorado el uso de nanopartículas con plata para la inhibición de este sistema sensor de quórum (Singh et al., 2015). A pesar de ello, aún permanece abierta la posibilidad de realizar la modificación genética dirigida a la eliminación o atenuación de factores de virulencia específicos en aquellas cepas ambientales para uso biotecnológico industrial.

Por otra parte, aunque se sabe que actualmente no existen productos a base de biosurfactantes en el mercado nacional, la obtención de la derivada no virulenta de la cepa de *P. aeruginosa* PA14 o de cepas ambientales permitiría explorar la producción de RLs en el país. Lo anterior podría abordarse mediante la creación de una empresa de base tecnológica o la transferencia de tecnología a una empresa nacional especializada en desarrollar productos a base de surfactantes (detergentes o productos de higiene personal) o con fines de biorremediación. Es evidente que la implementación de esto puede tener un alto impacto económico inicial. No obstante, al considerar el enorme potencial industrial de los RLs y la alta demanda en el mercado mundial, la puesta en marcha de esta propuesta abriría un área de oportunidad para que nuestro país comience a proyectarse en el mercado mundial como productor de RLs y, entonces, competir con compañías internacionales como: NatSurFact (EE. UU.), AGAE Technologies Ltd. (EE. UU.), Rhamnolipid, Inc. (EE. UU.), GlycoSurf (EE. UU.), TensioGreen (EE. UU.) y Jeneil Biosurfactant (Alemania).

Otras moléculas de interés biotecnológico producidas por *P. aeruginosa*

P. aeruginosa se caracteriza por una enorme capacidad biosintética y versatilidad metabólica, dado que además de producir RLs, esta bacteria es capaz de sintetizar otras moléculas, entre las que se incluyen enzimas, piocianina, lactonas, exopolisacáridos (alginatos) y polímeros de almacenamiento intracelular (polihidroxialcanoatos, PHAs) (Figura 5).

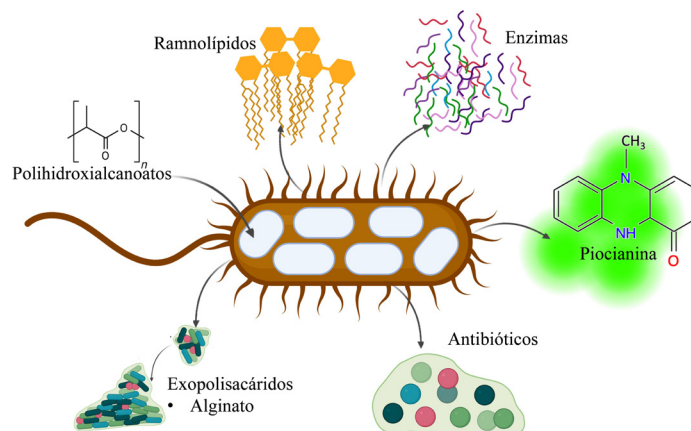


Figura 5. Moléculas de interés biotecnológico producidas por *P. aeruginosa*
Fuente: Propia



En particular, la piocianina, responsable de la coloración azul-verde característica de *Pseudomonas* spp., tiene aplicaciones en medicina, alimentación, productos farmacéuticos, biocontrol, nanotecnología, textiles, acuicultura y agricultura. Su versatilidad y multifuncionalidad la convierten en una sustancia muy prometedora en diversos campos a nivel industrial (Balakrishnan et al., 2022; Jabłońska et al., 2023; Jimmy et al., 2024; Shouman et al., 2023). Por otro lado, los PHAs, biopolímeros compuestos por monómeros de 3-hidroxi-ácidos grasos, se almacenan como reserva energética de la bacteria y se consideran polímeros naturales y prometedores sustitutos de los plásticos petroquímicos. Por ello, han sido utilizados ampliamente en las industrias farmacéuticas, médicas y de envasado debido a su alta biocompatibilidad (Kana-vaki et al., 2021). Además, pueden obtenerse simultáneamente con los RLs, lo que constituiría un proceso de producción aún más sostenible y económicamente viable (Gutiérrez-Gómez et al., 2018).

Conclusiones y perspectivas

Pseudomonas aeruginosa es conocida por producir RLs con diversas aplicaciones industriales. Sin embargo, México actualmente carece de productos comerciales a base de estas moléculas debido a la ausencia de procesos de producción establecidos. La investigación se ha dirigido al desarrollo de cepas como la no virulenta PA14, que pueden modificarse genéticamente, o bien el aislamiento de cepas ambientales para mejorar la producción de RLs. A medida que se avanza con las investigaciones, el potencial de producción viable podría aumentar al aprovechar fuentes alternativas de carbono e implementar estrategias de optimización, promoviendo así la sostenibilidad ambiental y económica. Para expandir el mercado nacional y reemplazar los surfactantes sintéticos en numerosas aplicaciones, incluida la biorremediación, es crucial estandarizar los procesos de producción a escala industrial. Esta iniciativa requiere la colaboración entre la comunidad científica y la industria, lo que podría posicionar a México para captar una mayor participación en el mercado nacional y mundial de surfactantes.

Conflicto de intereses

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

Referencias

Al-Maddboly, L. A., El-Salam, M. A., Bastos, J. K., Hasby, E. A., Kushkevych, I., & El-Morsi, R. M. (2025). Anti-biofilm and anti-quorum sensing activities of galloylquinic acid against clinical isolates of multidrug-resistant *Pseudomonas*



- aeruginosa* in open wound infection: *in vitro* and *in vivo* efficacy studies. *BMC Microbiology*, 25(1), 206. <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03712-8>
- Arora, J., Ranjan, A., Chauhan, A., Biswas, R., Rajput, V. D., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Minkina, T., & Jindal, T. (2022). Surfactant pollution, an emerging threat to ecosystem: Approaches for effective bacterial degradation. *Journal of Applied Microbiology*, 133(3), 1229–1244. <https://doi.org/10.1111/jam.15631>
- Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B. V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Tripathi, M. (2022). Recent Strategies for Bioremediation of Emerging Pollutants: A Review for a Green and Sustainable Environment. *Toxics*, 10(8), 484. <https://doi.org/10.3390/toxics10080484>
- Balakrishnan, S., Ameer, A., Pazhur Mohandas, S., Maliyekkal Sajeevan, A. K., Bhaskaran Sathyabhama, A., & Singh, B. (2022). Pyocyanin as a safe aquaculture drug for the control of vibriosis in shrimp recirculating aquaculture system (RAS). *Aquaculture International*, 30(4), 2129–2144. <https://doi.org/10.1007/s10499-022-00890-y>
- Cerqueira dos Santos, S., Araújo Torquato, C., de Alexandria Santos, D., Orsato, A., Leite, K., Serpeloni, J. M., Losi-Guembarovski, R., Romão Pereira, E., Dyna, A. L., Lopes Barboza, M. G., Fernandes Arakawa, M. H., Pires Bitencourt, J. A., da Cruz Silva, S., da Silva Sá, G. C., Dias Rodrigues, P., Quintella, C. M., & Faccin-Galhardi, L. C. (2024). Production and characterization of rhamnolipids by *Pseudomonas aeruginosa* isolated in the Amazon region, and potential antiviral, antitumor, and antimicrobial activity. *Scientific Reports*, 14(1), 4629. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54828-w>
- Chen, P., Qin, J., Su, H. K., Du, L., & Zeng, Q. (2024). Harmine acts as a quorum sensing inhibitor decreasing the virulence and antibiotic resistance of *Pseudomonas aeruginosa*. *BMC Infectious Diseases*, 24(1), 760. <https://doi.org/10.1186/s12879-024-09639-9>
- Chicca, I., Becarelli, S., & Di Gregorio, S. (2022). Microbial Involvement in the Bioremediation of Total Petroleum Hydrocarbon Polluted Soils: Challenges and Perspectives. *Environments*, 9(4), 52. <https://doi.org/10.3390/environments9040052>
- Christova, N., Kabaivanova, L., Nacheva, L., Petrov, P., & Stoineva, I. (2019). Biodegradation of crude oil hydrocarbons by a newly isolated biosurfactant producing strain. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 33(1), 863–872. <https://doi.org/10.1080/13102818.2019.1625725>
- Dittmann, H., Déziel, E., Henkel, M., & Hausmann, R. (2023). Rhamnolipids—Has the promise come true? En G. Soberón-Chávez (ed.), *Biosurfactants* (pp. 69–84). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91697-4.00004-1>



- Eslami, P., Hajfarajollah, H., & Bazsefidpar, S. (2020). Recent advancements in the production of rhamnolipid biosurfactants by *Pseudomonas aeruginosa*. *RSC Advances*, 10(56), 34014–34032. <https://doi.org/10.1039/D0RA04953K>
- Garg, Rajni, Garg, Rishav, Anjum, A., Eddy, N. O., & Watandost, H. (2025). Comprehensive review of the synthesis and sustainable applications of biosurfactants. *Discover Applied Sciences*, 7(10), 1168. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07603-z>
- Gutiérrez-Gómez, U., & Soberón-Chávez, G. (2024). *Método para la construcción de cepas del género Pseudomonas para disminuir su virulencia e incrementar su producción de Rhamnolípidos, y productos obtenidos con el mismo* (Patent MX/a/201/006840).
- Gutiérrez-Gómez, U., Soto-Aceves, M. P., Servín-González, L., & Soberón-Chávez, G. (2018). Overproduction of rhamnolipids in *Pseudomonas aeruginosa* PA14 by redirection of the carbon flux from polyhydroxyalkanoate synthesis and overexpression of the rhlAB-R operon. *Biotechnology Letters*, 40(11–12), 1561–1566. <https://doi.org/10.1007/s10529-018-2610-8>
- Huerta-Hernández, R. G. (2024). *Aislamiento y caracterización de cepa de Pseudomonas aeruginosa a partir de suelo potencialmente contaminado con hidrocarburos proveniente de la población de Teotitlán de Flores Magón, Oaxaca*. Universidad de la Cañada.
- Jabłońska, J., Augustyniak, A., Dubrowska, K., & Rakoczy, R. (2023). The two faces of pyocyanin - why and how to steer its production? *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(4), 103. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03548-w>
- Jimmy, J., Priyaja, P., Puthumana, J., Joseph, V., & Bright Singh, I. S. (2024). Pyocyanin as a promising drug in aquaculture. *Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 12(1), 64–70. https://www.researchgate.net/publication/382657125_Pyocyanin_as_a_promising_drug_in_aquaculture
- Kanavaki, I., Drakonaki, A., Geladas, E. D., Spyros, A., Xie, H., & Tsiotis, G. (2021). Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production in *Pseudomonas* sp. phDV1 Strain Grown on Phenol as Carbon Sources. *Microorganisms*, 9(8), 1636. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081636>
- Mata-Guadarrama, M. A. (2022). *Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos pesados utilizando biosurfactantes y surfactantes químicos* [tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]. Repositorio Institucional UAM. <https://doi.org/10.24275/uama.6734.9922>
- Oluwaseun, A. C., Julius Kola, O., Mishra, P., Ravinder Singh, J., Kumar Singh, A., Singh Cameotra, S., & Oluwasesan Micheal, B. (2017). Characterization and optimization of a rhamnolipid from *Pseudomonas aeruginosa* C1501 with novel biosurfactant activities. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 6, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2017.07.001>



- Phulpoto, I. A., Yu, Z., Li, J., Ndayisenga, F., Hu, B., Qazi, M. A., & Yang, X. (2022). Evaluation of di-rhamnolipid biosurfactants production by a novel *Pseudomonas* sp. S1WB: Optimization, characterization and effect on petroleum-hydrocarbon degradation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 242, 113892. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113892>
- Reynolds, N. (2023). Bioremediation vs. Traditional Remediation Methods: A Comparative Analysis. *Journal of Biodiversity, Bioprospecting and Development*, 9(1), 60–61. <https://www.hilarispublisher.com/open-access/bioremediation-vs-traditional-remediation-methods-a-comparative-analysis.pdf>
- Rezaei, Z., & Moghimi, H. (2024). Fungal-bacterial consortia: A promising strategy for the removal of petroleum hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 280, 116543. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116543>
- Safari, P., Hosseini, M., Lashkarbolooki, M., Ghorbani, M., & Najafpour Darzi, G. (2023). Evaluation of surface activity of rhamnolipid biosurfactants produced from rice bran oil through dynamic surface tension. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(10), 2139–2153. <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01660-z>
- Samuel-Osamoka, F. C., Arotupin, D. J., Olaniyi, O. O., & Banat, I. M. (2023). Production of Rhamnolipids by *Pseudomonas aeruginosa* HB6 (39) Isolated from Petroleum-Hydrocarbon Contaminated Environment. *European Journal of Biology and Biotechnology*, 4(3), 1–9. <https://doi.org/10.24018/ejbio.2023.4.3.439>
- Sánchez, C. (2022). A review of the role of biosurfactants in the biodegradation of hydrophobic organopollutants: production, mode of action, biosynthesis and applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(11), 216. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03401-6>
- Shouman, H., Said, H. S., Kenawy, H. I., & Hassan, R. (2023). Molecular and biological characterization of pyocyanin from clinical and environmental *Pseudomonas aeruginosa*. *Microbial Cell Factories*, 22(1), 166. <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02169-0>
- Singh, B. R., Singh, B. N., Singh, A., Khan, W., Naqvi, A. H., & Singh, H. B. (2015). Mycofabricated biosilver nanoparticles interrupt *Pseudomonas aeruginosa* quorum sensing systems. *Scientific Reports*, 5(1), 13719. <https://doi.org/10.1038/srep13719>
- Sinumvayo, J. P. (2015). Agriculture and Food Applications of Rhamnolipids and its Production by *Pseudomonas Aeruginosa*. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 06(02). <https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000223>
- Soberón-Chávez, G., González-Valdez, A., Soto-Aceves, M. P., & Cocotl-Yañez, M. (2021). Rhamnolipids produced by *Pseudomonas* : from molecular ge-



- netics to the market. *Microbial Biotechnology*, 14(1), 136–146. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13700>
- Tiso, T., Zauter, R., Tulke, H., Leuchtle, B., Li, W.-J., Behrens, B., Wittgens, A., Rosenau, F., Hayen, H., & Blank, L. M. (2017). Designer rhamnolipids by reduction of congener diversity: production and characterization. *Microbial Cell Factories*, 16(1), 225. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0838-y>
- Varjani, S., Rakholiya, P., Yong Ng, H., Taherzadeh, M. J., Hao Ngo, H., Chang, J.-S., Wong, J. W. C., You, S., Teixeira, J. A., & Bui, X.-T. (2021). Bio-based rhamnolipids production and recovery from waste streams: Status and perspectives. *Bioresource Technology*, 319, 124213. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124213>
- Zhao, Y., Sun, Y., Sun, H., Zuo, F., Kuang, S., Zhang, S., & Wang, F. (2024). Surfactant-Based Chemical Washing to Remediate Oil-Contaminated Soil: The State of Knowledge. *Toxics*, 12(9), 648. <https://doi.org/10.3390/toxics12090648>
- Zhuang, X., Wang, Y., Wang, H., Dong, Y., Li, X., Wang, S., Fan, H., & Wu, S. (2022). Comparison of the efficiency and microbial mechanisms of chemical- and bio-surfactants in remediation of petroleum hydrocarbon. *Environmental Pollution*, 314, 120198. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120198>



ALIMENTACIÓN, SALUD Y MEDIOAMBIENTE





¿En Guadalajara gusta más el yogurt con grasa o sin grasa? Impacto de la sensibilidad gustativa

What do you like more? Full-fat or fat-free yogurt. Impact of taste sensitivity

Andrea Berenice De la Cruz Pérez^{2,3}, Paulina Bouchan Torres³ y Socorro J. Villanueva Rodríguez^{1,2*}

¹ Unidad de Tecnología Alimentaria del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del estado de Jalisco (CIATEJ), Sede Guadalajara.

² Posgrado en Innovación Biotecnológica del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).

³ Centro Universitario Tonalá de la Universidad de Guadalajara (CU-TONALA UdeG).

*Autor de correspondencia: Socorro J. Villanueva Rodríguez, svillanueva@ciatej.mx

Palabras clave:

yogurt, contenido de grasa, sensibilidad gustativa, nivel de agrado, comportamiento alimentario

Resumen

La ingesta frecuente de alimentos altos en grasa puede contribuir al sobrepeso y obesidad y representa un factor de riesgo para la salud por ello, es indispensable buscar soluciones al problema. El placer producido por estimulación de receptores gustativos por la grasa contribuye al gusto por alimentos grasos. Este estudio, estuvo orientado a evaluar el impacto de la sensibilidad gustativa, contenido de grasa e información sobre la composición nutrimental de yogures con contenido creciente de grasa, sobre el nivel de agrado. El estudio fue realizado con 40 estudiantes (20-25 años) de la Universidad de Guadalajara. Se observó una tendencia del efecto del contenido de grasa sobre el nivel de agrado: yogures con mayor contenido de grasa tienden a ser menos gustados. El efecto de la información depende de la sensibilidad gustativa, el agrado por yogures con mayor contenido de grasa disminuyó significativamente en participantes con sensibilidad intermedia al gusto amargo.

Abstract

Frequent consumption of high-fat foods can contribute to overweight and obesity and represents a health risk factor; therefore, it is essential to find solutions to this problem. The pleasure derived from the stimulation of taste receptors by fat contributes to the preference for fatty foods. This study aimed to evaluate the impact of taste sensitivity, fat content, and information on the nutritional composition of yogurts with increasing fat content on the level of liking. The study was conducted with 40 students (20-25 years old) from the University of Guadalajara. A trend was observed regarding the effect of fat content on the level of liking: yogurts with higher fat content tended to be less liked. The effect of information depends on taste sensitivity; liking for yogurts with higher fat content decreased significantly in participants with intermediate sensitivity to bitter tastes.

Keywords:

yogurt, fat content, taste sensitivity, liking level, eating behavior

Recibido: 21 de agosto 2025
Revisado: 17 de diciembre 2025
Aceptado: 30 de diciembre 2025
Publicado: 23 de febrero 2026



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

La elección del tipo, la cantidad y la calidad de los alimentos que ingerimos tiene un origen multifactorial complejo; sin embargo, uno de los factores preponderantes en la decisión es el placer que los alimentos propician a través de los sentidos, es decir, el nivel de agrado (Sobal et al., 2014). Del mismo modo, las causas por las cuales gusta un alimento también son multifactoriales: influyen la cultura, la familiaridad con los alimentos, los sabores y las texturas. Por su parte, la percepción de los colores, apariencias, sabores, olores y texturas dependen directamente de la sensibilidad gustativa, si contamos con una sensibilidad gustativa suficiente, es decir si nuestros receptores sensoriales funcionan y registran claramente los diferentes componentes del sabor, olor y textura podremos percibir estas características y con base en ello se generará la sensación, placentera o no que puede detonar un alimento y con ello podremos decidir si nos gusta o no y decidiremos si nos gusta o no el alimento (Forde y de Graaf, 2022; Yusufali et al., 2024). Cuando nuestros receptores no funcionan o no registran los distintos estímulos o componentes del alimento, probablemente los criterios de elección de un alimento estén determinados por factores distintos de la composición (Kershaw et al., 2018).

La exploración de los complejos factores que determinan la elección e ingesta de alimentos es de suma importancia en cuestiones de salud pública, ya que la calidad nutricional y la cantidad de alimentos ingeridos están íntimamente relacionadas con la salud y en la actualidad tienen un efecto significativo sobre la incidencia de obesidad y sobrepeso (Stover et al., 2023). En ese sentido, el consumo de alimentos altos en grasa, que excedan los requerimientos nutricionales y energéticos del organismo, contribuye de manera significativa al sobrepeso o a la obesidad (Wang et al., 2020).

En la actualidad es de gran importancia sumarse a las investigaciones orientadas a entender los factores y mecanismos relacionados con la obesidad y el sobrepeso, ya que son dos graves problemas de salud pública en México y en el mundo. Esta condición impacta directamente en la calidad de vida del individuo, poniendo en riesgo su salud, y es capaz de detonar enfermedades crónico-degenerativas que a su vez son la causa de enfermedades más graves, muchas de las cuales son mortales (Torres y Rojas, 2018; Hernández-Medina, 2020). El impacto también es económico, principalmente por el gasto extremo, tanto para el bolsillo de cada ciudadano como para el presupuesto de salud pública, que implican los tratamientos que la población requiere para luchar contra las enfermedades que la obesidad y el sobrepeso detonan (Mexico Health Review, 2019).

Diversos trabajos de investigación han reportado que una baja sensibilidad al amargo está relacionada con una baja sensibilidad al estímulo graso (Vignini et al., 2019). Existen algunos estudios que indican que existe una correlación inversa entre la sensibilidad al amargo y la ingesta de grasa o alimentos ricos en grasa (Graham et al., 2021). Es decir



que personas con nula o poco sensibles al gusto amargo son poco sensibles a la percepción de la grasa y tienden a consumir alimentos con mayor cantidad de grasa, dada su baja sensibilidad. El estudio de esta relación puede ayudar a entender, en algunos casos, la ingesta excesiva de grasa, lo que orienta en la búsqueda de soluciones para orientar formulaciones, tecnologías y/o políticas públicas orientadas a producir, proveer y facilitar el acceso a alimentos equilibrados en nutrientes que a su vez respondan a las expectativas de la población o de los consumidores. Por otro lado, existen estudios que muestran un efecto positivo de informar a los consumidores o a la población sobre la calidad nutricional de un producto saludable o no saludable, puede tener un efecto en el nivel de agrado de dicho producto (Kantola y col., 2025) Debido a lo anterior, el presente estudio estuvo orientado a evaluar el nivel de agrado de productos lácteos, considerados alimentos saludables: leche y yogures con tres niveles crecientes en contenido de grasa, en una población joven caracterizada en función de su sensibilidad al gusto amargo y bajo dos condiciones, sin información y con información, sobre el contenido de grasa de los yogures. La hipótesis a evaluar fue que la información tendría una influencia sobre el nivel de agrado dependiendo de la sensibilidad al amargo de los participantes.

Materiales y Métodos

La estrategia metodológica fue la siguiente:

Se evaluó el nivel de agrado de cuatro yogures, diferentes en su contenido de grasa. En la prueba participaron 40 jóvenes de entre 20 y 25 años, todos estudiantes del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. 12 de los 40 jóvenes fueron caracterizados como no sensibles al amargo o no degustadores (ND), 13 de los participantes fueron medianamente sensibles al amargo o medio degustadores (MD) y los 15 restantes fueron altamente sensibles al amargo o súper degustadores (SD). Esta clasificación se realizó mediante la prueba conocida como “Prueba de gusto PROP o de las tres soluciones”, desarrollada por Teper et al. (2001). Se les presentaron las cuatro muestras: yogurt con 0.6%, 1.5%, 2.4% y 3.5% de grasa. Cada uno de los tres grupos calificó el nivel de agrado de estos cuatro productos bajo dos condiciones: Condición A: sin información sobre el contenido de grasa de los productos y Condición B: con información sobre el contenido de grasa de los productos.

Descripción de las metodologías

El reclutamiento de los jóvenes: para este propósito, se incluyeron jóvenes que no tuvieran problemas de salud diagnosticados, no estuvieran llevando un plan de alimentación en específico, que fueran consumidores de yogurt. Se excluyeron aquellos que presentaran enfermedades crónico-degenerativas o en etapas fisiológicas especiales como embarazo o lactancia.



Prueba de gusto PROP o prueba de las tres soluciones

La medición de la sensibilidad gustativa se realizó mediante el uso de la escala de magnitud etiquetada (LMS) de 10 cm, en donde los participantes marcaron la intensidad percibida para seis soluciones, tres con propiltiouracilo (PROP) (0.032 mM, 0.32 mM y 3.2 mM) y NaCl (0.01 M, 0.1 M y 1.0 M). Las muestras se sirvieron en vasos desechables transparentes del número 0, etiquetadas con números de tres dígitos. Previo a la realización de la prueba se dio la instrucción a los panelistas sobre el uso y llenado de la escala LMS. Al momento de la prueba al panelista se le dio la instrucción de sostener la muestra en la boca, agitar y expectorar y posteriormente indicar la intensidad percibida de cada solución en la escala LMS. Los panelistas se clasificaron como no-degustadores (ND) cuando la evaluación de la intensidad de NaCl es más alta que PROP, súper-degustadores (SD) si la curva de intensidad al PROP es más alta que NaCl y medio-degustadores (MD) si las curvas se superponen (Tepper, 2001).

Elaboración del yogurt

La elaboración de las cuatro muestras de yogurt se llevó a cabo de la siguiente manera: primeramente, se calentó la leche a 60 °C, una vez lograda esa temperatura se añadió leche entera en polvo hasta alcanzar los 16 °Bx, posteriormente se pasteurizaron a 90 °C por 10 min. Para la incorporación del cultivo láctico se temperó la leche a 43 °C y se añadió la cantidad de grasa de cada muestra (0.6%, 1.5%, 2.4% y 3.3%); la grasa que se añadió fue con nata marca Bionda®. Una vez que las formulaciones tenían la grasa necesaria, se pasó a incubación a 43 °C durante 5 hrs. Por último, pasaron a refrigeración a una temperatura de 4 °C donde se almacenaron para su uso en las pruebas de nivel de agrado.

Medición del nivel de agrado

El nivel de agrado se midió bajo dos condiciones (dos sesiones): la primera sin conocimiento de la información nutrimental y la segunda mediante la información con etiquetas de las tablas nutrimentales de cada yogurt. Se utilizó una escala no estructurada de 10 cm en la cual se presentaron las cuatro muestras de yogurt al mismo tiempo en orden aleatorio en vasos previamente codificados para que el participante colocara el nivel de agrado percibido. En la segunda sesión se presentaban de igual forma las cuatro muestras de yogurt al mismo tiempo, con su respectiva etiqueta con tabla nutrimental en orden del contenido de grasa para que el participante volviera a marcar en la escala no estructurada el nivel de agrado percibido.

Resultados y Discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos sobre la clasificación de los productos en función del nivel de agrado en condición no informada e informada,

por parte de los tres grupos de participantes clasificados en función de su sensibilidad al amargo. Se compararon los valores promedio de nivel de agrado en función de cada grupo de participantes y cada % de grasa, aplicando la prueba T de Student con una $P_{H0}=0.05$, con el fin de evaluar la significancia del efecto de la información sobre los valores promedio de nivel de agrado. Los cálculos de T fueron realizados mediante las herramientas de cálculos estadísticos de Excel.

Como puede observarse en la Figura 1, en el caso del grupo de personas no sensibles al gusto amargo (ND), no se observó efecto de la información sobre el contenido de grasa y la composición en nutrientes. No hubo diferencia significativa de los valores promedio de nivel de agrado de los yogures de los cuatro diferentes contenidos de grasa, ni efecto de la información nutricional. En el caso de este grupo no sensibles al gusto amargo. Al parecer, a falta de la información gustativa, las personas (ND) utilizan otros criterios de decisión para definir el nivel de agrado. En este caso de los yogures, podría pensarse que tal vez utilicen las sensaciones percibidas a través de los mecanorreceptores que permiten evaluar la textura y consistencia de los productos en boca, como lo han demostrado algunos estudios (Drewnowski & Almiron-Roig, 2010; Costanzo et al., 2017), ya que este grupo muestra una tendencia a apreciar menos el yogurt con mayor contenido de grasa, aunque la diferencia entre el nivel de agrado promedio del yogurt con 0.6% de grasa y el de 3.3% de grasa no es significativa.

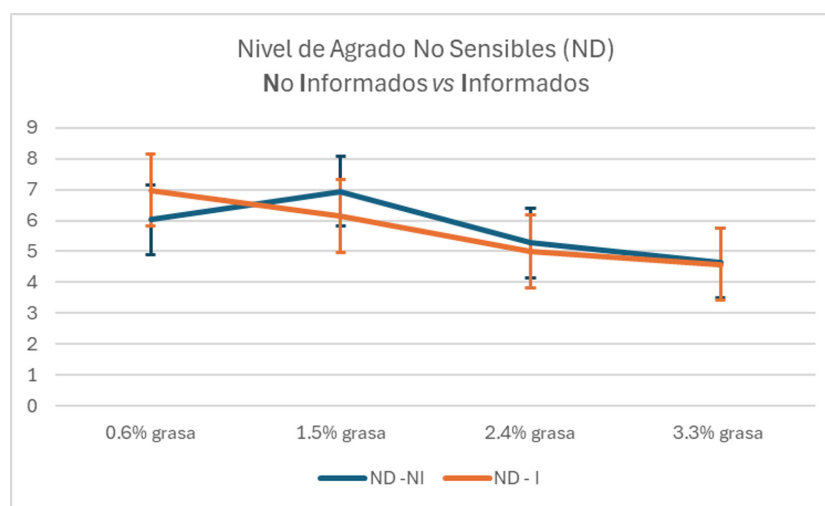


Figura 1. Nivel de agrado de cuatro yogures con contenido creciente de grasa, evaluados por personas no sensibles al gusto amargo (ND), en condición: **No Informada** y en condición: **Informada**

Por su parte, el nivel de agrado de los participantes medianamente sensibles sí fue afectado de manera significativa por la información nutricional. Particularmente en el caso de los yogures con mayor contenido de grasa (2.4 y 3.3%) (Figura 2),



fueron significativamente menos apreciados ($P < 0.05$) en condición informada que en condición no informada. Este comportamiento podría deberse a que la componente gustativa, sumada a la percepción de textura, potencia la información sensorial (Chen & Eaton, 2012). Sin información nutricional, el criterio que determina el nivel de agrado es la componente hedónica, significativamente influenciada por el placer que produce la cremosidad (Antmann et al., 2010).

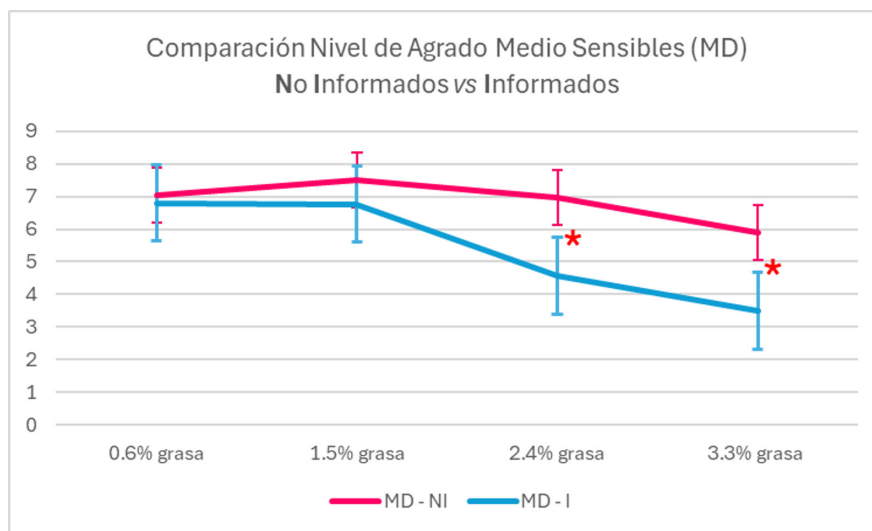


Figura 2. Nivel de agrado de cuatro yogures con contenido creciente de grasa, evaluados por personas medianamente sensibles al gusto amargo (MD), en condición: **No Informada** y en condición: **Informada**

En el caso del grupo de personas muy sensibles al gusto amargo (SD) (Figura 3), al igual que los otros dos grupos, mostraron una tendencia a apreciar menos los yogures con mayor contenido de grasa. Aunque la diferencia entre los valores de nivel de agrado para los yogures con 0.6% de grasa, respecto a los valores de nivel de agrado de los yogures con 3.3% de grasa, no es significativa. Para este grupo, el efecto de la información nutricional, de manera general, tuvo un efecto contrario al que tuvo sobre el grupo medianamente sensible al gusto amargo. En este caso, globalmente la información propició un mayor nivel de agrado para todos los yogures; sin embargo, esta diferencia fue mínima, excepto para el nivel de agrado del yogurt con menor contenido de grasa, el cual gustó significativamente más en condición informada. El resultado en este grupo parece privilegiar el criterio nutricional, evitando al máximo la grasa. Probablemente, en este grupo, a diferencia de los dos grupos anteriores, la información gustativa contribuye y permite la percepción de la cremosidad a bajas concentraciones de grasa. Al parecer, la alta saturación de papilas fungiformes propicia que altos contenidos de grasa representen una sobreestimulación (Donovan et al., 2016) y esto sea un factor que determine que este segmento de superdegustadores prefiera el yogurt con el menor contenido de grasa

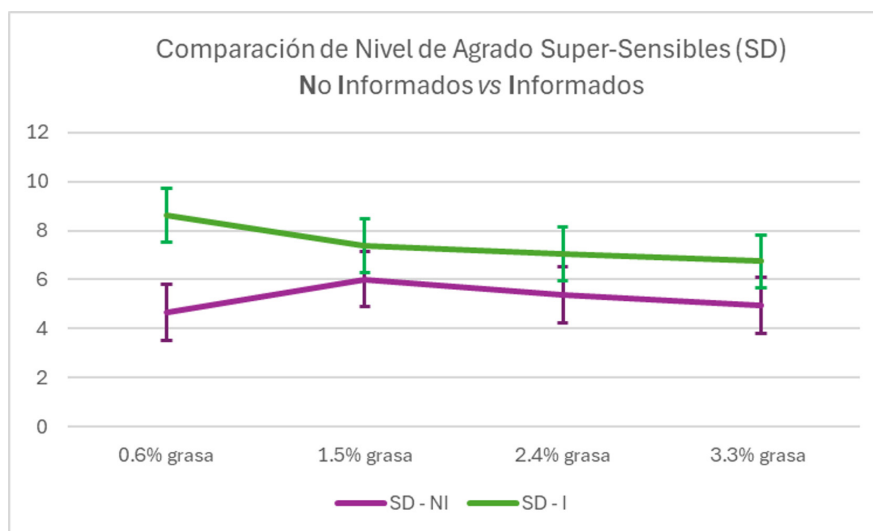


Figura 3. Nivel de agrado de cuatro yogures con contenido creciente de grasa, evaluados por personas supersensibles al gusto amargo (SD), en condición: **No Informada** y en condición: **Informada**

Por otro lado, en general, tanto en condición no informada como en condición informada, los tres grupos de participantes muestran una tendencia a gustar menos de los yogures con mayor contenido de grasa. Esto podría deberse a que, en este caso, la incorporación de nata al yogurt se realizó mediante un simple mezclado, no se aplicó un proceso de homogeneización, lo que puede propiciar que, al estar en boca, la persona perciba directamente la grasa en la superficie de la matriz en lugar de un todo homogéneo y agradable descrito como “cremosidad” (Dresselhuys et al., 2008; Benjamins et al., 2009), atributo que, por su parte, es significativo en la preferencia del consumidor (Bolini et al., 2025).

Conclusiones

Tras el análisis de los resultados y tomando en cuenta la hipótesis establecida en este trabajo, se puede concluir que: 1) es probable que las personas poco sensibles (ND), debido a su poca sensibilidad gustativa, utilizan diferentes criterios que los medio degustadores (MD) y los superdegustadores (SD) para percibir las propiedades de los alimentos, entre ellos la cremosidad y a partir de ello, determinar su gusto por los alimentos. 2) La población que cuenta con una sensibilidad intermedia percibe más la cremosidad que los no degustadores, pero toma en cuenta la información nutricional para redireccionar su gusto. 3) En el caso de los super degustadores, se incrementa ligeramente el nivel de agrado al ser informados sobre el contenido de grasa, y dada su capacidad para percibir la grasa, prefieren el yogurt con menor contenido de grasa. 4) La tendencia observada para los tres grupos sobre la disminución del agrado por los yogures con mayor contenido de grasa, tanto en condición



informada como no informada, parece estar influenciada más que por los aspectos de sensibilidad, por la falta de homogeneidad de la grasa en el producto.

El presente trabajo permitió implementar una metodología para evaluar el impacto de la sensibilidad gustativa, el contenido creciente de grasa y la información sobre la composición en nutrientes, particularmente el contenido de grasa de un alimento, sobre el nivel de agrado de un producto lácteo, considerado como un alimento sano como es el yogurt. Sin embargo, si bien se observaron tendencias del efecto del contenido de grasa, la sensibilidad gustativa y la condición informada sobre el nivel de agrado de yogures para tener resultados más robustos y confirmar el efecto de estos factores, es necesario aumentar el tamaño de la muestra poblacional, así como diversificar el segmento de consumidores, ya que en esta ocasión solo participaron representantes de un sector joven con estudios universitarios. Adicionalmente, parece un factor importante la adecuada homogeneización de la grasa incorporada al yogurt.

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

Este trabajo contó con el financiamiento de CONACYT hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) a través del proyecto de la convocatoria de Ciencia de Frontera: CF-2019/87193 “RELACIÓN ENTRE GENOTIPOS ASOCIADOS CON SENSIBILIDAD GUSTATIVA A LOS ESTIMULOS AMARGO Y GRASO, PREFERENCIAS ALIMENTARIAS Y OBESIDAD” con clave 87193.

Agradecimientos

Las autoras de esta comunicación corta, agradecemos a los estudiantes del CU-TONALA de la UdeG y a las autoridades de la Carrera de Nutrición de este plantel por las facilidades otorgadas para la realización de este estudio piloto.

Referencias

- Forde, C.G., & de Graaf, K. (2022). Influence of Sensory Properties in Moderating Eating Behaviors and Food Intake. *Frontiers in Nutrition*, 9, 841444. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.841444>.
- Graham C.A_M., Pilic L., McGrigor E., Brown M., Easton I.J., Kean J.N., Sarel V., Wehliye Y., Davis N., Nisrin Hares N., Barac D., King A., & Mavrommatis Y. (2021). The Associations Between Bitter and Fat Taste Sensitivity, and Dietary



- Fat Intake: Are They Impacted by Genetic Predisposition? *Chemical Senses*, 46, bjab029 <https://doi.org/10.1093/chemse/bjab029>
- Hernández Medina, M. S. (2020). Overview of the epidemic overweight and obesity in Mexico. *Mexican Journal of Medical Research ICSA*, 8(16), 65–71. <https://doi.org/10.29057/mjmr.v8i16.3926>
- Kantola M., Junkkari T., Hopia A., & Luomala H. (2025). Food consumption motivations override and moderate the effect of nutrition label on responses to (un) healthy products. *Food Quality and Preference*, 131, 105568. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2025.105568>
- Kershaw J.C., & Richard D. Mattes R.D. (2018). Nutrition and taste and smell dysfunction. *World Journal of Otorhinolaryngology - Head and Neck Surgery*, 4(1), 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.wjorl.2018.02.006>
- Sobal J., Bisogni C.A., & Jastran M. (2014). Food Choice Is Multifaceted, Contextual, Dynamic, Multilevel, Integrated, and Diverse. *Mind Brain and Education*, 8(1), 6-12 <https://doi.org/10.1111/mbe.12044>
- Stover P.J., Field M.S., Andermann M.L., Bailey R.L., Batterham R.L., Cauffman E., Frühbeck G., Per O. Iversen P. O., Starke-Reed P., Sternson S.M., Vinoy S., Witte A.V., Zuker C.S., & Angelin B. (2023). Neurobiology of eating behavior, nutrition, and health. *Journal of Internal Medicine*, 294(5), 582–604. <https://doi.org/10.1111/joim.13699>
- Tepper, B., & Ullrich, N. (2001). Influence of genetic taste sensitivity to 6-n-propylthiouracil (PROP), dietary restraint and disinhibition on body mass index in middle-aged women. *Physiology & Behavior*, 75(3), 305-312. [https://doi.org/10.1016/S0031-9384\(01\)00664-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9384(01)00664-3)
- Torres F. y Rojas A. (2018). Obesity and Public Health in Mexico. Transforming the Hegemonic Food Supply and Demand Pattern. *Revista Latinoamericana de Economía*, 49(193), 145-169. <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2018.193.63185>
- Yusufali Z., Aschenberg L., Juma S., & Du X. (2024). Satiety Sensation and Its Associated Food Compositions and Flavors Chapter 15. En X. Du & J. Yang (eds.) *Flavor-Associated Applications In Health and Wellness Food Product* (pp. 371-398). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51808-9>
- Wang, L., Wang, H., Zhang, B., Popkin, B. M., & Du, S. (2020). Elevated Fat Intake Increases Body Weight and the Risk of Overweight and Obesity among Chinese Adults: 1991–2015 Trends. *Nutrients*, 12(11), 3272. <https://doi.org/10.3390/nu12113272>



***Cannabis*: de la medicina tradicional en México a fuente de moléculas bioactivas**

Cannabis: from traditional medicine in Mexico to a source of bioactive molecules

Marco Antonio Rivas-Pedraza^{1,2}, Ana Laura Márquez-Aguirre^{3*}

¹ Sioltalife S.A.P.I. de C.V., México.

² Maestría en Investigación Clínica, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., México.

³ Unidad de Biotecnología Médica y Farmacéutica, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.

*Autor de correspondencia: amarquez@ciatej.mx

Palabras clave:

Cannabis, cannabinoides, CBD, Δ 9-THC

Resumen

Cannabis sativa es una planta ancestralmente utilizada con fines medicinales. Contiene una mezcla compleja de metabolitos secundarios, entre los que destacan un grupo de compuestos terpeno-fenólicos denominados cannabinoides o fitocannabinoides. Entre los más comunes se encuentran el tetrahidrocannabinol (THC) y el cannabidiol (CBD). El ácido Δ 9-tetrahidrocannabinol (Δ 9-THCA) es el principal compuesto psicoactivo de la planta, y su forma farmacológicamente activa es el Δ 9-tetrahidrocannabinol (Δ 9-THC). Muchos de los cannabinoides, incluido el (Δ 9-THC), ejercen sus efectos fisiológicos y farmacológicos a través del sistema endocanabinoide. Esta revisión analiza el papel del *Cannabis* en la medicina tradicional mexicana y su transición hacia su reconocimiento científico como fuente de moléculas bioactivas (fitocannabinoides) con potencial terapéutico. No obstante, persisten desafíos regulatorios, sociales y éticos que limitan su plena integración médica, por lo que su aprovechamiento seguro y eficaz requiere mayor investigación clínica, estándares claros de calidad y seguridad, marcos regulatorios sólidos y una adecuada educación sobre su uso.

Abstract

Cannabis sativa has been used for medicinal purposes since ancient times. It contains a complex mixture of secondary metabolites, among which a group of terpeno-phenolic compounds known as cannabinoids stand out. The most common include tetrahydrocannabinol (THC) and cannabidiol (CBD). Δ 9-tetrahydrocannabinolic acid (Δ 9-THCA) is the main psychoactive precursor of the plant, and its pharmacologically active form is Δ 9-tetrahydrocannabinol (Δ 9-THC). Many cannabinoids, including Δ 9-THC, exert their physiological and pharmacological effects through the endocannabinoid system. This review analyzes the role of *Cannabis* in traditional Mexican medicine and its transition toward scientific recognition as a source of bioactive molecules (phytocannabinoids) with therapeutic potential. Beyond its stigmatization, *Cannabis* has been integrated into Mexican herbal medicine as a therapeutic resource and is now recognized as an important source of cannabinoids with potential clinical applications in the management of chronic pain, epilepsy, spasticity, nausea, and other refractory conditions. Nevertheless, regulatory, social, and ethical challenges persist that limit its full medical integration; therefore, its safe and effective use requires further clinical research, clear quality and safety standards, solid regulatory frameworks, and proper education on its appropriate use.

Keywords:

Cannabis, cannabinoids, CBD, Δ 9-THC

Recibido: 21 de octubre 2025

Revisado: 05 de diciembre 2025

Aceptado: 30 de diciembre 2025

Publicado: 23 de febrero 2026



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

Cannabis sativa L. pertenece a la familia de plantas Cannabaceae, que solo tiene un género (*Cannabis*) con una sola especie muy variable, *C. sativa*. Esta planta fue domesticada en Asia Central hace aproximadamente 12,000 años (Crocq, 2020). Con el paso del tiempo, su empleo se extendió alrededor del mundo, llegando a ser incluida en algunas farmacopeas en siglo XIX. Sin embargo, ya en el siglo XX fue estrictamente prohibida y eliminada de la farmacopea británica debido a su alto riesgo de abuso, la dificultad de elaborar preparados estandarizados y la difusión del uso recreativo (Brunetti, 2020).

En países como México, donde el uso de la herbolaria es frecuente, plantas como la *Cannabis* se emplean ampliamente desde la época colonial. Según datos de la Secretaría de Salud a través de la CONASAMA, el consumo de *Cannabis* con fines medicinales sigue extendiéndose en la población mexicana. Esto refleja no solo su arraigo cultural, sino también como alternativa para el alivio de diversos padecimientos (Pech-Puebla, 2024).

El *Cannabis* medicinal es un término que se utiliza para hacer énfasis a un uso potencialmente terapéutico, siendo el dolor crónico la razón más común citada en su aplicación clínica (Islas-Andrade, 2023).

Por ello, esta revisión analiza el papel del *Cannabis* en la medicina tradicional mexicana y su transición hacia su reconocimiento científico como fuente de moléculas bioactivas con actividad farmacológica. Se consultaron bases de datos y repositorios especializados como PubMed, NCBI, Scielo y Redalyc, además de documentos oficiales emitidos por organismos internacionales y nacionales, entre ellos la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Administración de Alimentos y Medicamentos de EE.UU., (FDA) y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), la Secretaría de Salud, entre otras fuentes nacionales.

Desarrollo

Cannabis en la herbolaria mexicana

El *Cannabis* llegó a México durante la época colonial, ya que fue introducida por los españoles principalmente para la producción de fibra, pero pronto fue integrada en la herbolaria por el reconocimiento de sus propiedades medicinales. Durante el siglo XIX y principios del XX se le consideró parte del patrimonio botánico nacional e incluso fue incluida en la Farmacopea Mexicana de 1846 y en ediciones posteriores, en las que se regulaba su uso como medicamento sin restricciones legales. Se documentó su aplicación en cataplasmas, ungüentos, tinturas, aceites, jarabes, infusiones, horchatas, baños medicinales e incluso fumada, por sus efectos analgésicos, antiinflamatorios, relajantes y paliativos, empleándose para tratar dolores musculares



y reumáticos, cólicos, hemorroides, neuralgias, cefaleas, trastornos gastrointestinales, asma, insomnio, inflamación de mucosas, dolor dental, regulación menstrual y como apoyo en padecimientos como la gonorrea. Asimismo, fue incorporada por médicos de la época en distintos preparados terapéuticos, lo que evidencia que, más allá de su efectos psicoactivos, la *Cannabis* fue reconocida en la tradición herbolaria y en la medicina formal mexicana como un medicamento natural con aplicaciones concretas en la salud popular, antes de que los cambios regulatorios y la estigmatización redujeran su valoración a sus riesgos asociados (Nava-Rodríguez, 2023), (Nava Rodríguez, 2025), (Campos, 2012), (Schievenini & Pérez-Ricart, 2020).

***Cannabis* como fuente de moléculas bioactivas: los cannabinoides**

Se han reportado más de 500 compuestos de *Cannabis*, de los cuales 125 se clasifican como cannabinoides. Mientras que los constituyentes no cannabinoides incluyen fenoles no-cannabinoides (estilbenoides, lignanos, espiroindanos y dihidrofenantrenos, flavonoides, terpenos, alcoholes, alcaloides, entre otros) (Radwan, 2021; Odiaka, 2022).

Los cannabinoides se caracterizan por una estructura terpeno-fenólica C₂₁. Esta nomenclatura se puede aplicar a cannabinoides progenitores, derivados de cannabinoides y productos de transformación. Por lo tanto, los cannabinoides se pueden subclasificar en 11 tipos: cannabicromeno (CBC), cannabidiol (CBD), cannabielsoína (CBE), cannabigerol (CBG), cannabicitrol (CBL), cannabinol (CBN), cannabidiol (CBND), cannabitriol (CBT), (-)- Δ^8 -trans-tetrahidrocannabinol (Δ^8 -THC), (-)- Δ^9 -trans-tetrahidrocannabinol (Δ^9 -THC) y cannabinoides de tipo misceláneo (Radwan, 2021). Siendo el Δ^9 -THC y el CBD son los más estudiados (Figura 1).

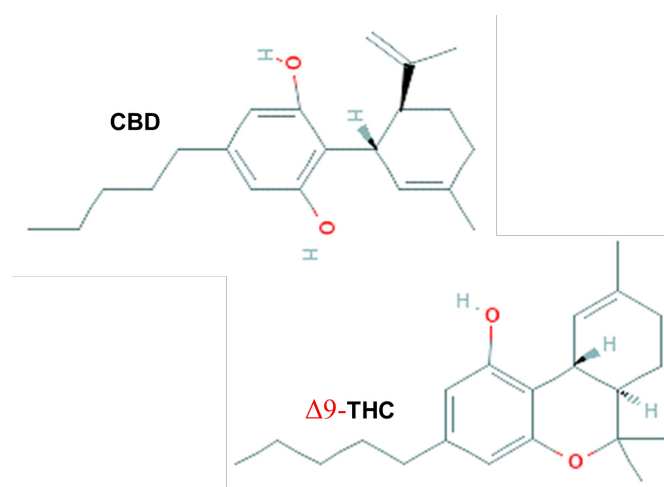


Figura 1. Estructuras químicas del CBD, Δ^9 -THC. Los cannabinoides son compuestos químicos que suelen tener una estructura carbocíclica con 21 carbonos y están formados generalmente por tres anillos, ciclohexeno, tetrahidropirano y benceno

Fuente: Tomadas de PubChem



De acuerdo a esta composición de cannabinoides se pueden distinguir cinco quimiotipos diferentes de *C. sativa* según los niveles de Δ^9 -tetrahidrocannabinol (THC), cannabidiol (CBD) y cannabigerol (CBG): quimiotipo I con niveles altos ($>0,3\%$) de THC y bajos ($<0,5\%$) de CBD, también conocido como el tipo de droga o *Cannabis* o marihuana; quimiotipo II con niveles altos ($>0,3\%$) de THC y altos ($>0,5\%$) de CBD, también conocido como tipo intermedio; y tres quimiotipos caracterizados por un nivel bajo ($<0,3\%$) de THC, también conocido como “cáñamo” o “cáñamo industrial”, que incluyen el quimiotipo III con un nivel alto ($>0,5\%$) de CBD, el quimiotipo IV con un nivel alto ($>0,3\%$) de CBG y el quimiotipo V con niveles de cannabinoides casi indetectables (Trono, 2024).

Actividad biológica de los cannabinoides

Desde el punto de vista farmacológico, una sustancia psicoactiva es aquella capaz de actuar sobre el sistema nervioso central modificando la percepción, el estado de ánimo, la cognición o la conducta. En contraste, una sustancia psicotrópica produce alteraciones más intensas de los procesos mentales, con potencial de inducir dependencia, tolerancia y efectos neuropsiquiátricos significativos, por lo que está sujeta a control regulatorio estricto. En este contexto, el Δ^9 -THC puede presentar efectos psicoactivos y, dependiendo de la dosis y vía de administración, también efectos psicotrópicos. Dosis superiores a 10–20 mg de Δ^9 -THC, especialmente en comestibles o consumo frecuente, pueden inducir efectos psicotrópicos como paranoia, psicosis transitoria y dependencia. Dosis bajas suelen limitarse a efectos psicoactivos (Ley General de Salud, 2025), (Kebede, 2022), (Legare CA, 2022), (Arnold, 2021).

La Tabla 1, muestra algunas de las actividades biológicas descritas para los principales cannabinoides. Es importante mencionar que gran parte de los efectos descritos corresponden a evidencia preclínica (es decir, estudios *in vitro* o en modelos animales), estudios observacionales, reportes clínicos, protocolos clínicos sin resultados aún publicados y no constituyen indicaciones clínicas aprobadas. Su uso médico debe basarse en estudios clínicos controlados y en regulaciones vigentes para confirmar su eficacia y seguridad.

**Tabla 1.** Potenciales aplicaciones terapéuticas descritas para los cannabinoides

Compuesto	Aplicación biológica	Referencia
Δ^9 -THCA	Neuroprotección con reducción de patología amiloide/tau en modelos de Alzheimer, antiemético, inmunomodulador, anticancerígeno y analgésico (estimula la señalización dependiente de CB1 en la línea celular de neuroblastoma N18TG2).	(Ayodeji O. Oriola, 2024), (Odieka, 2022) (Kim J., 2023)
Δ^9 -THC	Analgésico, antiemético, tratamiento de espasticidad en esclerosis múltiple, estimulante del apetito, antiinflamatorio, antioxidante, antiulceroso, antipruriginoso.	(Ayodeji O. Oriola, 2024), (Odieka, 2022) (Hoch, 2025)
CBDA	Antiemético y neuroprotección; interacción con receptores muscarínicos, se revirtieron los déficits de memoria y se redujo la patología de beta-amiloide y Tau en un modelo murino similar a la enfermedad de Alzheimer.	(Ayodeji O. Oriola, 2024) (Albayrak, 2025)
CBD	Anticonvulsivo en epilepsias refractarias, ansiolítico, neuroprotector, antiemético, antiartrítico, antipsicótico, antiinflamatorio con propiedades inmunomoduladoras, además de efectos antidiabéticos, antiateroscleróticos, antihipertensivos y beneficios en síndrome metabólico, lesión por isquemia-reperfusión, enfermedad de Alzheimer, así como actividad antidepresiva y analgésica en dolor neuropático.	(Ayodeji O. Oriola, 2024) (Javadzadeh) (Odieka, 2022) (Espinosa-Jovel, 2020)
CBN	Mejora del sueño en insomnio, sedante, antibiótico, anticonvulsivo, antiinflamatorio.	(Ayodeji O. Oriola, 2024) (Lavender, 2023)
CBNA	Potencial en motilidad gastrointestinal y permeabilidad intestinal, propiedad antioxidante debida a la actividad de eliminación de radicales libres.	(Ayodeji O. Oriola, 2024) (Crowley R. O., 2025)
Cannabicromeno (CBC):	Antiinflamatorio/analgésico y antidepresivo, antiinflamatorio, antimicrobiano, antineoplásico	(Ayodeji O. Oriola, 2024), (Odieka, 2022) (Sepulveda DE, 2024)
CBCA	Actividad antibacteriana rápida contra <i>Staphylococcus aureus</i> resistente a meticilina, antibacteriano, antimicótico.	(Ayodeji O. Oriola, 2024), (Odieka, 2022)
Cannabigerol (CBG)	Antioxidante, antiinflamatorio y con efecto analgésico, antibacteriano, neuroprotector, anti-glaucoma, ansiolítico y anti-estrés.	(Ayodeji O. Oriola, 2024), (Odieka, 2022) (Cuttler, 2024)

Los cannabinoides presentan un mecanismo de acción semejante al de los opioides, ya que producen una inhibición de la actividad neuronal mediante distintos procesos celulares: bloquean la enzima adenilato ciclasa, reduciendo la producción de AMPc y la activación de proteínas intracelulares; aumentan la conductancia al potasio, lo que hiperpolariza la neurona y dificulta su activación; y disminuyen la conductancia al calcio al limitar la entrada de iones positivos. Estos efectos ocurren principalmente a través de los receptores CB1, presentes en neuronas que liberan neurotransmisores como dopamina, serotonina, glutamato y GABA. Al unirse los cannabinoides a dichos receptores en el botón sináptico, se genera una hiperpolarización que inhibe la liberación de neurotransmisores, ejerciendo un efecto neu-



romodulador que modifica la actividad de otras neuronas (Walsh, 2020; Hempel B, 2022; Schurman LD, 2020; Jurga M, 2024).

Estos mecanismos moleculares explican cómo los cannabinoides ejercen su efecto neuromodulador a nivel celular. Sin embargo, su acción no se limita a la inhibición de neurotransmisores, sino que forma parte de un sistema más amplio de señalización: el sistema endocannabinoide, encargado de regular múltiples funciones fisiológicas y mantener la homeostasis del organismo. El sistema endocannabinoide es un mecanismo de señalización celular que actúa como regulador de múltiples funciones del cuerpo. Aunque todavía no se conocen todos sus alcances, se sabe que participa en procesos tan diversos como el sueño, el estado de ánimo, la memoria, el apetito, la digestión, el metabolismo, la respuesta al dolor, la inflamación, la reproducción y hasta el crecimiento óseo y la salud de la piel. En otras palabras, es un sistema clave para mantener el equilibrio interno, o homeostasis, del organismo. Cabe señalar que no todos los cannabinoides actúan sobre el mismo sistema ni con la misma afinidad hacia los receptores del SEC, lo que explica la diversidad de efectos fisiológicos y terapéuticos observados (Sallaberry & Astern, 2018), (Inzunza-C & Peña-V, 2019).

Este sistema funciona gracias a tres componentes principales (Figura 3):

- **Receptores cannabinoides (CB1 y CB2):** El CB1 se encuentra sobre todo en el sistema nervioso central y regula la liberación de neurotransmisores como serotonina, dopamina y GABA. El CB2 se localiza principalmente en células del sistema inmune y está relacionado con procesos inflamatorios.
- **Ligandos cannabinoides:** Son las moléculas que activan estos receptores. Incluyen los endocannabinoides producidos naturalmente por el cuerpo, como la anandamida (AEA) y el 2-araquidonilglicerol (2-AG), así como los fitocannabinoides presentes en la planta de *Cannabis*.
- **Enzimas reguladoras:** Se encargan de sintetizar y degradar los endocannabinoides una vez que cumplen su función, evitando que permanezcan demasiado tiempo en altas concentraciones. Entre ellas destacan la FAAH (hidrolasa de amidas de ácidos grasos), que degrada la anandamida, y la MAGL (lipasa de monoacilglicerol), que descompone el 2-AG.

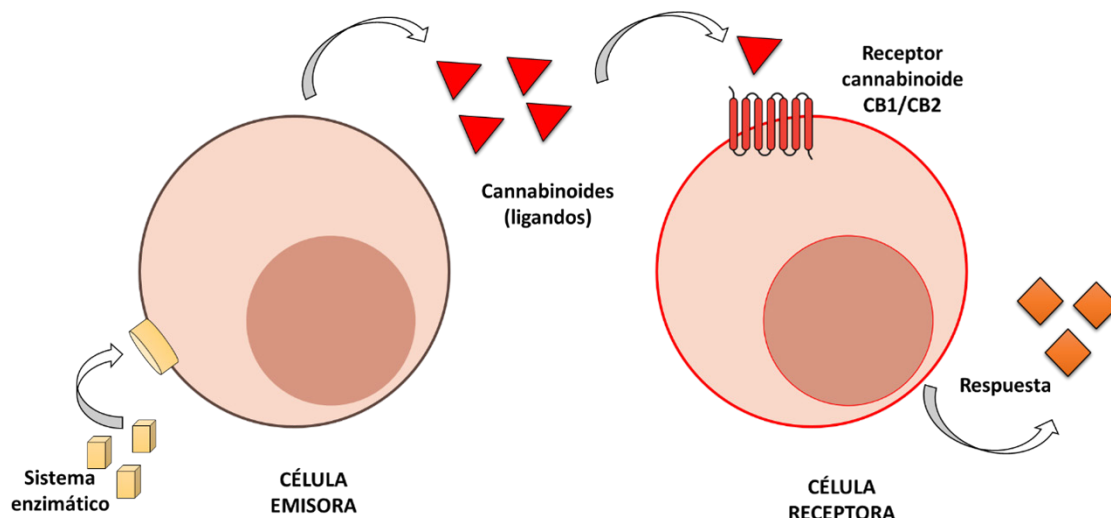


Figura 2. Mecanismos de acción de los Cannabinoides sobre el sistema endocannabinoide. La célula emisora (izquierda) sintetiza y libera ligandos cannabinoides (endocannabinoides) que actúan sobre la célula receptora (derecha) mediante la activación de receptores específicos (CB1 o CB2), desencadenando una respuesta celular. El sistema enzimático asociado regula tanto la síntesis como la degradación de los endocannabinoides. Los cannabinoides exógenos como los fitocannabinoides pueden actuar sobre este sistema

Fuente: Modificada de (Inzunza-C & Peña-V, 2019)

Medicamentos a base de cannabinoides

Hasta el 2015 en Estados Unidos fueron aprobados por la FDA únicamente dos medicamentos que contienen compuestos con actividad tipo Δ^9 -THC: el dronabinol (Marinol®) y nabilona (Cesamet®). Ambos están indicados principalmente para el control de náuseas y vómitos inducidos por quimioterapia, y en el caso del dronabinol, también para la estimulación del apetito en pacientes con pérdida de peso asociada a SIDA, representando los primeros cannabinoides sintéticos con uso médico regulado y efectos directos sobre el sistema nervioso central. Posteriormente, se desarrollaron formulaciones más complejas que combinan distintos cannabinoides. Un ejemplo es Nabiximols (Sativex®), un aerosol bucal que combina Δ^9 -THC con CBD derivados de *Cannabis* en una proporción casi 1:1, está indicado para el tratamiento de la espasticidad y el dolor neuropático que pueden acompañar la esclerosis múltiple. Esta formulación ilustra el enfoque terapéutico de aprovechar la acción complementaria de ambos compuestos. Por otra parte, el cannabidiol adquirió relevancia clínica independiente con la aprobación de Epidiolex® en 2018 por la FDA. Este medicamento, formulado como solución oral de CBD, está indicado para el tratamiento de trastornos de convulsiones como epilepsia infantil, síndrome de Dravet y el síndrome de Lennox-Gastaut (Epidiolex, 2019).



En la Tabla 3 se resumen los principales medicamentos aprobados a base de cannabinoides, sus indicaciones terapéuticas, moléculas bioactivas, forma farmacéutica, origen y estatus regulatorio.

Tabla 3. Medicamentos aprobados a base de cannabinoides

Medicamento	Indicación terapéutica	Forma farmacéutica	Molécula bioactiva	Origen	Estatus Regulatorio	
Marinol®	Estimula el apetito en pacientes con SIDA y ayuda contra náuseas de quimioterapia.	Cápsulas gelatinosas	Dronabinol (Δ^9 -THC)	Sintético	✓	FDA
					✓	EMA
					X	COFEPRIS
Cesamet®	Reduce náuseas y vómitos de quimioterapia cuando otros fármacos fallan.	Cápsulas	Nabilona (similar a Δ^9 -THC)	Sintético	✓	FDA
					✓	EMA
					X	COFEPRIS
Sativex®	Alivia dolor neuropático y espasticidad en esclerosis múltiple.	Aerosol bucal	Nabiximols (THC con CBD derivados de Cannabis)	Fitocannabinoides, extracto estandarizado	X	FDA
					✓	EMA
					?	COFEPRIS
Epidiolex®	Tratamiento de convulsiones en epilepsia infantil y síndromes específicos.	Solución oral	Cannabidiol (CBD derivado de Cannabis)	Fitocannabinoides	✓	FDA
					✓	EMA
					X	COFEPRIS

Fuente: (Epidiolex, 2019), (Marinol, 2004), (Epidiolex, 2020), (Cesamet, 2006), (Sativex, 2018)

Nota 1: Aprobación (en el país o parte de la Unión Europea) / X sin aprobación/? Sin aprobación clara, solo se permite importación.

Nota 2: En México (COFEPRIS) no figura un listado completo de estos medicamentos bajo registro sanitario formal; la regulación actual permite importación con prescripción médica y evaluación caso por caso, y productos derivados de *Cannabis* con menos de 1 % de Δ^9 -THC han sido autorizados como suplementos o materias primas, pero no como medicamentos estandarizados con registro sanitario completo.

Regulación de *Cannabis*

El uso clínico de los cannabinoides enfrenta varias limitaciones que van más allá de sus posibles beneficios. La calidad y composición de la planta pueden variar según la especie, el cultivo y la preparación, lo que dificulta estandarizar dosis y efectos. Además, aún faltan estudios sólidos que comparen su eficacia con la de otros tratamientos, lo que hace que la evidencia disponible sea heterogénea y de calidad variable. También existen riesgos de efectos adversos, tanto inmediatos como a largo plazo, incluyendo dependencia o problemas respiratorios y cardiovasculares. A esto se suman barreras de acceso derivadas de costos, burocracia o ilegalidad en algunos países, así como la falta de educación y regulación claras que generan desinformación y mitos. Fi-



nalmente, su uso plantea dilemas éticos y sociales relacionados con la seguridad, la autonomía de los pacientes y el equilibrio entre salud pública y libertad individual.

En México, el Reglamento de *Cannabis* de 2021 marcó un avance importante al establecer lineamientos generales para la producción, investigación y uso medicinal del *Cannabis* y sus derivados farmacológicos. Sin embargo, este marco normativo aún presenta vacíos regulatorios que limitan su aplicación práctica y generan incertidumbre tanto para profesionales de la salud como para pacientes (Presidencia de la República, 2021), (García, 2025), (Martínez & López, 2023).

Algunos de los contextos actuales en materia de regulación:

- **COFEPRIS como autoridad sanitaria**

En nuestro país, es la encargada de autorizar y vigilar los productos derivados del *Cannabis*. Marca una diferencia entre *Cannabis* medicinal y cáñamo industrial, asignando requisitos distintos en materia de trazabilidad, calidad y buenas prácticas de manufactura.

- **Prescripción médica restringida**

Solo ciertos productos con autorización sanitaria pueden ser prescritos, generalmente aquellos con concentraciones específicas de cannabinoides (como THC o CBD). Esto limita la disponibilidad de opciones terapéuticas y deja fuera a muchos preparados que circulan en el mercado sin respaldo científico ni registro oficial.

- **Ausencia de protocolos clínicos claros**

A diferencia de países como Canadá o Países Bajos, México carece de guías clínicas homologadas para el uso de *Cannabis* medicinal. Esto provoca que los médicos enfrenten inseguridad jurídica y falta de criterios uniformes para prescribir, dosificar y dar seguimiento a los pacientes.

- **Mercado gris y suplementos con CBD**

La ambigüedad regulatoria ha permitido que productos con CBD se comercialicen como suplementos alimenticios, incluso con indicaciones terapéuticas no comprobadas. Esta situación abre espacios para la informalidad, afecta la protección del consumidor y dificulta la consolidación de un mercado regulado.

Conclusiones

El uso médico del *Cannabis* representa un campo en expansión que, aunque ya cuenta con medicamentos aprobados para tratar náuseas, vómitos, ciertos tipos de dolor, epilepsia y la pérdida de apetito en pacientes con SIDA, aún enfrenta importantes retos. La evidencia disponible muestra beneficios potenciales, pero también señala la necesidad de ensayos clínicos bien diseñados que permitan comparar su efica-



cia frente a terapias convencionales y explorar nuevas indicaciones en áreas como cáncer, artritis o trastornos psiquiátricos. Más allá de los aspectos farmacológicos, el *Cannabis* medicinal plantea desafíos relacionados con la calidad de los productos, la seguridad, la regulación, la accesibilidad y los dilemas éticos que acompañan su integración en la práctica clínica. En este sentido, su desarrollo debe abordarse con rigor científico, responsabilidad médica y sensibilidad social, reconociendo tanto su valor histórico en la herbolaria mexicana como su papel actual como fuente de moléculas bioactivas con aplicaciones terapéuticas. Asimismo, persisten retos regulatorios, sociales y éticos que requieren soluciones integrales adaptadas al contexto mexicano. Futuras investigaciones deberán enfocarse en la estandarización de dosis y formulaciones, la evaluación de efectos a largo plazo y el diseño de políticas públicas que garanticen acceso seguro y equitativo.

Conflicto de intereses

Marco Antonio Rivas Pedraza tiene participación en Síoltalife S.A.P.I. de C.V.

Financiamiento

Beca de colegiatura CONACYT otorgada para M.A. R. P. del programa de Maestría en Investigación Clínica (matrícula: 1804SG6461).

Referencias

- Albayrak, M., & Buyuker, S. M. (2025). In Silico Investigation of the Effect of Cannabidiolic Acid (CBDA) on Muscarinic Acetylcholine Receptors by Molecular Docking Method. *Pharmedicine Journal*, 2(2), 50–58. <https://doi.org/10.62482/pmj.22>
- Arnold, J. (2021). A primer on medicinal *Cannabis* safety and potential adverse effects. *Australian Journal of General Practice*, 50(6), 345-350. <https://doi.org/10.31128/ajgp-02-21-5845>
- Ayodeji O. Oriola, P. K. (2024). *Cannabis sativa* as an Herbal Ingredient: Problems and Prospects. *Molecules*, 29(15). doi:10.3390/molecules29153605
- Brunetti, P. P. (2020). Herbal Preparations of Medical *Cannabis*: A Vademecum for Prescribing Doctors. *Medicina*, 56(5), 237. <https://doi.org/10.3390/medicina56050237>
- Campos, I. (2012). *Home Grown: Marijuana and the Origins of Mexico's War on Drugs*. University of North Carolina Press. https://doi.org/10.5149/9780807882689_campos
- Cesamet. (2006). *Valeant Pharmaceuticals International NDA 18-677/S-011*. Obtenido de https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/label/2006/018677s011lbl.pdf



- Crocq, M. A. (2020). History of *Cannabis* and the endocannabinoid system. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 22(3), 223-228. doi: <https://doi.org/10.31887/DCNS.2020.22.3/mcrocq>
- Crowley, R. O. (2025). Effects of cannabinoids on intestinal motility, barrier permeability, and therapeutic potential in gastrointestinal diseases. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(12), 6682. <https://doi.org/10.3390/ijms25126682>
- Cuttler, C. S. (2024). Acute effects of cannabigerol on anxiety, stress, and mood: a double-blind, placebo-controlled, crossover, field trial. *Scientific Reports*, 14(66879). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66879-0>
- Epidiolex. (2019). *HIGHLIGHTS OF PRESCRIBING INFORMATION*. Obtenido de <https://pp.jazzpharma.com/pi/epidiolex.en.USPI.pdf>
- Espinosa-Jovel, C. (2020). Cannabinoides en epilepsia: eficacia clínica y aspectos farmacológicos. *Neurología*, 38(1), 49-55. doi: 10.1016/j.nrl.2020.02.005
- García, J. A. (2025). Medical *Cannabis* in Mexico: a look at the bill for its regulation. *Dossier Medicinal Cannabis: Saúde e Sociedade*, 34(1). e240251pt. <https://doi.org/10.1590/S0104-12902025240251en>
- Hempel B, X. Z. (2022). Receptor mechanisms underlying the CNS effects of cannabinoids: CB1 receptor and beyond. En *Advances in Pharmacology* (pp. 275-333). <https://doi.org/10.1016/bs.apha.2021.10.006>
- Hoch, E. B. (2025). *Cannabis*, cannabinoids and health: A review of evidence on risks and medical benefits. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 281-292. doi:<https://doi.org/10.1007/s00406-024-01880-2>
- Inzunza-C, G., & Peña-V, A. (2019). Del *Cannabis* a los cannabinoides una perspectiva médico-científica. *Revista de Medicina de la Universidad Autónoma de Sinaloa*, 9(2), 96-114. <http://dx.doi.org/10.28960/revmeduas.2007-8013.v9.n2.006>
- Islas-Andrade, Sergio, Rocha-Arrieta, Luisa L., Arrieta, Oscar, Celis, Miguel A., Domínguez-Cherit, Judith, Lifshitz, Alberto, Mansilla-Olivares, Armando, Martínez, Iris, Mimenza, Alberto José, Moreno, Mucio, Reyes-Sánchez, Alejandro A., Ruiz-Argüelles, Guillermo J., Soda-Merhy, Antonio, Sotelo, Julio, Toussaint, Sonia, Vilar-Compte, Diana, & Verástegui, Emma. (2023). Cannabinoides y su uso terapéutico. *Gaceta médica de México*, 159(1), 1-2. Epub 02 de mayo de 2023.<https://doi.org/10.24875/gmm.22000184>
- Javadzadeh, N. G.-Z. (s.f.). Cannabidiol exerts anticonvulsant effects alone and in combination with Δ^9 -THC through the 5-HT_{1A} receptor in the neocortex of mice. *Cells*, 13(6), 466. <https://doi.org/10.3390/cells13060466>
- Jurga, M., Jurga, A., Jurga, K., Kaźmierczak, B., Kuśmierczyk, K., & Chabowski, M. (2024). Cannabis-Based Phytocannabinoids: Overview, Mechanism of



- Action, Therapeutic Application, Production, and Affecting Environmental Factors. *International journal of molecular sciences*, 25(20), 11258. <https://doi.org/10.3390/ijms252011258>
- Kebede, L. M. (2022). Medicinal *Cannabis* pharmacokinetics and potential methods of delivery. *harmaceutical Development and Technology*, 27(2), 202-214. <https://doi.org/10.1080/10837450.2022.2035748>
- Kim J., C. P.-T.-C. (2023). The Cannabinoids, CBDA and THCA, Rescue Memory Deficits and Reduce Amyloid-Beta and Tau Pathology in an Alzheimer's Disease-like Mouse Model. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(7), 6827. <https://doi.org/10.3390/ijms24076827>
- Lavender, T. S. (2023). Cannabinol (CBN; 30 and 300 mg) effects on sleep and next-day function in insomnia disorder ('CUPID' study): Protocol for a randomised, double-blind, placebo-controlled trial. *BMJ Open*, 13(8), e071148. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-071148>
- Legare, C. A., Raup-Konsavage, W. M., & Vrana, K. E. (2022). Therapeutic Potential of Cannabis, Cannabidiol, and Cannabinoid-Based Pharmaceuticals. *Pharmacology*, 107(3-4), 131–149. <https://doi.org/10.1159/000521683>
- Ley General de Salud. (2025). *TITULO DECIMOSEGUNDO*. Obtenido de Control Sanitario de Productos y Servicios y de su Importación y Exportación: <https://salud.gob.mx/unidades/cdi/legis/lgs/index-t12.htm>
- Marinol. (Septiembre de 2004). *Solvay Pharmaceuticals NDA 18-651/S-021 500012*. Obtenido de https://www.accessdata.fda.gov/drugsatfda_docs/label/2005/018651s021lbl.pdf
- Martínez, J. A., & López, R. (2023). Regulación del *Cannabis* medicinal en México: avances y retos. *Revista Vitalia*, 6(2), 469-488. doi:<https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v6i2.612>
- Nava Rodríguez , M. I., & Martínez Gómez, J. A. (2025). Cannabis Medicinal en México: Crítica a su Regulación. *Revista Científica De Salud Y Desarrollo Humano*, 6(2), 469–488. <https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v6i2.612>
- Nava-Rodríguez, M. (Enero de 2023). *Bioética y Cannabis medicinal: Acceso legal y seguro al Cannabis medicinal en la herbolaria mexicana* [tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro]. Repositorio institucional UAQ. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/8204>
- Odieka, A. E. (2022). The Medicinal Natural Products of *Cannabis sativa* Linn.: A Review. *Molecules*, 27(5), 1689. <https://doi.org/10.3390/molecules27051689>
- Pech-Puebla, D. (2024). *Estudio sobre el uso de Cannabis y sus derivados en población mexicana*. Recuperado el 10 de January de 2026 de <https://www.gob.mx/>



- cms/uploads/attachment/file/892847/Estudio_sobre_el_uso_de_Cannabis_y_sus_derivados_en_poblacion_mexicana.pdf
- Presidencia de la República. (2021). *REGLAMENTO de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario para la Producción, Investigación y Uso Medicinal de la Cannabis y sus Derivados Farmacológicos*. Diario Oficial de la Federación. Obtenido de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609709&fecha=12/01/2021#gsc.tab=0
- Radwan, M. M. (2021). Cannabinoids, Phenolics, Terpenes and Alkaloids of *Cannabis*. *Molecules*, 26(9), 2774. doi:<https://doi.org/10.3390/molecules26092774>
- Sallaberry, C., & Astern, L. (Junio de 2018). The Endocannabinoid System, Our Universal Regulator. *Journal of Young Investigators*, 34(6), 48-55. doi:10.22186/jyi.34.5.48-55
- Schievenini, J., & Pérez-Ricart, C. (2020). Pasado y presente de los usos medicinales del *Cannabis* en México. *Revista de Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnología*, 26(50), 115-145. doi:10.48160/18517072re50.11
- Schurman, L. D., Lu, D., Kendall, D. A., Howlett, A. C., & Lichtman, A. H. (2020). Molecular Mechanism and Cannabinoid Pharmacology. *Handbook of experimental pharmacology*, 258, 323–353. https://doi.org/10.1007/164_2019_298
- Sepulveda DE, V. K.-K. (2024). The Potential of Cannabichromene (CBC) as a Therapeutic Agent. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 391(2), 206-213. <https://doi.org/10.1124/jpet.124.002166>
- Trono, D. (2024). *Cannabis sativa*: From Plants to Humans. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(24), 13288. <https://doi.org/10.3390/ijms252413288>
- Walsh, K. a. (2020). Molecular Pharmacology of Synthetic Cannabinoids: Delineating CB1 Receptor-Mediated Cell Signaling. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(17), 6115. doi:<https://doi.org/10.3390/ijms21176115>



Cáncer de pulmón en México: retos del sistema de salud pública y oportunidades en la biología molecular

Lung cancer in Mexico: challenges of the public health system and opportunities in molecular biology

Valentina Rueda Barrios¹, Luis Ángel Mendoza Torres², Silvia Mariela Montilla Fonseca², Irma Cruz Solís^{1*}

¹ Departamento de Bioingeniería, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Puebla. Puebla, México.

² Laboratorio de biología molecular, Labopat, Puebla, México.

*Autor de correspondencia: icruzs@tec.mx

Palabras clave:

cáncer de pulmón, secuenciación de nueva generación (NGS), biología molecular, salud pública.

Keywords:

lung cancer, next generation sequencing (NGS), molecular biology, public health.

Resumen

El cáncer de pulmón (CP) es la tercera causa de muerte por cáncer en el país, siendo los adenocarcinomas el tipo más común, especialmente entre los no fumadores. Entre los factores de riesgo destacan el tabaquismo, la exposición a sustancias como el asbesto y las predisposiciones genéticas. La mayoría de los casos de CP se detectan en etapas avanzadas, lo que dificulta el tratamiento. Tecnologías moleculares como la secuenciación de nueva generación (NGS) y la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) han mejorado el análisis genético, permitiendo ofrecer tratamientos más personalizados y terapias dirigidas a pacientes con cáncer ya diagnosticado. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos y los beneficios asociados, las limitaciones en la infraestructura del sistema de salud, las desigualdades en el acceso al tratamiento y la escasez de recursos médicos dificultan un manejo integral del cáncer de pulmón en México. Este panorama plantea importantes desafíos para el sistema de salud. El estudio subraya la necesidad de mejorar las capacidades diagnósticas y garantizar un acceso equitativo al tratamiento para abordar la creciente carga de CP en el país.

Abstract

Lung cancer (LC) is the third leading cause of death from cancer in the country, with adenocarcinomas being the most common type, especially among non-smokers. Risk factors include smoking, exposure to substances such as asbestos, and genetic predispositions. Most LC cases are detected at advanced stages, complicating treatment. Molecular technologies, such as next-generation sequencing (NGS) and polymerase chain reaction (PCR), have improved genetic analysis, enabling more personalized treatments and targeted therapies for diagnosed cancer patients. However, despite technological advances and their benefits, limitations in healthcare infrastructure, inequalities in treatment access, and a lack of medical resources hinder comprehensive management of lung cancer in Mexico. This scenario poses significant challenges to the healthcare system. The study highlights the need to improve diagnostic capabilities and ensure equitable access to treatment to address the growing burden of LC in the country.

Recibido: 22 de octubre 2025
Revisado: 26 de noviembre 2025
Aceptado: 30 de diciembre 2025
Publicado: 23 de febrero 2026



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 entendimiento de los orígenes del cáncer (oncogénesis) ha evolucionado en las últimas cuatro décadas, impulsado en gran parte por el desarrollo e innovación en la biología molecular, que ha brindado poderosas herramientas a los científicos. Estas innovaciones han permitido la secuenciación de genomas completos, facilitando el descubrimiento y análisis de la compleja maquinaria molecular que se ejecuta dentro de la célula con el propósito de entender sus funciones y detectar los defectos que causan que las células cancerosas proliferen de manera anormal (Hahn & Weinberg, 2015).

El cáncer es una enfermedad caracterizada por una proliferación descontrolada por parte de células transformadas sujetas a la evolución por selección natural; esta definición mejorada fue propuesta por Brown et al. (2023), que toma en consideración los cambios genéticos y epigenéticos que se acumulan dentro de una población de células cancerosas que conducen al fenotipo letal. Los autores afirman que las células cancerosas siguen los principios de la selección natural, lo que no solo explica cómo el cáncer evoluciona con el tiempo, sino que también abre nuevas perspectivas para desarrollar estrategias más eficaces de diagnóstico e intervención.

Cáncer de pulmón

El cáncer de pulmón (CP) es un tumor maligno que se desarrolla a partir de células, tanto pulmonares como bronquiales. EL CP se disemina de varias formas afectando la pleura (la membrana que recubre los pulmones), los vasos sanguíneos, los ganglios linfáticos y la pared torácica. La anatomía pulmonar y las estructuras involucradas en este proceso se detallan en la Figura 1. A su vez, puede propagarse a través del sistema linfático, afectando ganglios linfáticos bronquiales, hiliares y mediastinales. El cáncer genera metástasis a través del torrente sanguíneo, lo que le permite afectar órganos distantes. Los más comúnmente afectados por esta vía son los huesos, las glándulas suprarrenales, el hígado y el cerebro (Moctezuma Velasco & Zarco, 2009).

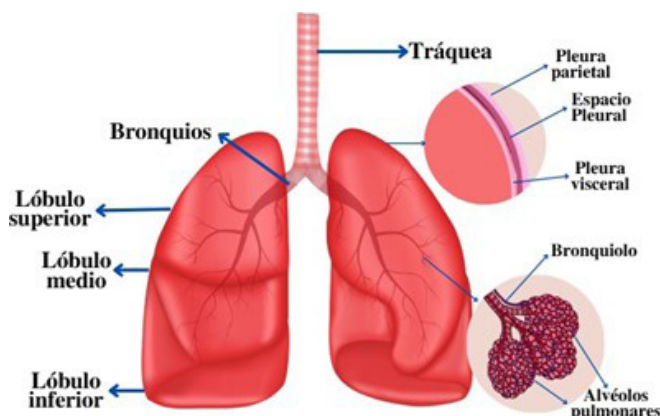


Figura 1. Anatomía del pulmón
Fuente: Elaboración propia utilizando Canva



El CP se divide en dos categorías, considerando el origen y el comportamiento de las células (Figura 2) : cáncer de pulmón de células pequeñas (CPCP) y cáncer de pulmón de células no pequeñas (CPCNP), donde la mayoría (75%) de los casos son CPCNP (Gridelli et al., 2015). Estos tipos de cáncer difieren en su biología, y en general, el CPCNP está compuesto por células más grandes y crece más lentamente en comparación con el CPCP. Este último conforma el 25% de los CP y se caracteriza por su agresividad y rápida proliferación. Está estrechamente relacionado con el tabaquismo, ya que una gran parte de los pacientes presenta historial de hábito tabáquico (Ginsberg et al., 2007).

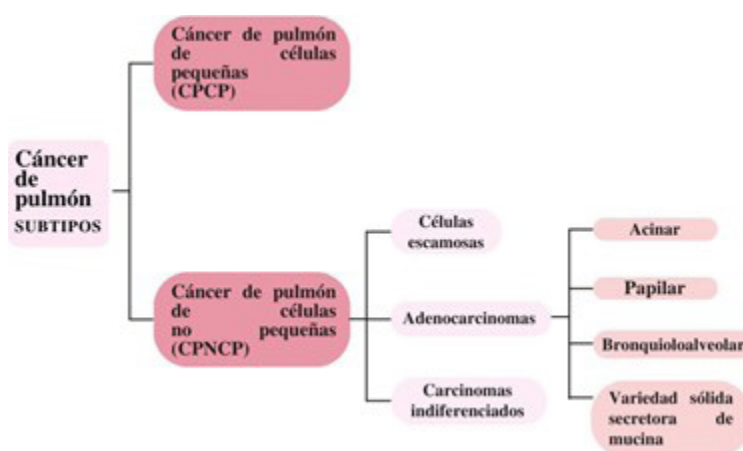


Figura 2. Clasificación de cáncer de pulmón
Fuente: Elaboración propia utilizando Canva

El CPCNP se divide en tres subtipos principales: cáncer de células escamosas, adenocarcinomas y carcinomas indiferenciados. El adenocarcinoma ocupa el primer lugar en frecuencia epidemiológica y es también el tipo más común en pacientes no fumadores; este surge de células mucoproducidas y se clasifica en cuatro subtipos: acinar, papilar, bronquioloalveolar y variedad sólida secretora de mucina (mucinoso). El cáncer de células escamosas representa el 30% de los casos de CP, teniendo una estrecha relación con el consumo de tabaco. Los carcinomas indiferenciados representan aproximadamente un 5%; entre estos está el carcinoma de células grandes, que puede generarse en cualquier parte del pulmón y también se asocia al tabaquismo (Gridelli et al., 2015).

Factores de riesgo

El CP se considera una enfermedad altamente relacionada con el tabaquismo, sin embargo, se requieren varios años de exposición para que se desarrolle la enfermedad (Weinberger et al., 2019). En el humo de los cigarrillos se han identificado



más de 69 carcinógenos conocidos, desde las nitrosaminas hasta benzo[a]pireno y otros hidrocarburos policíclicos. A pesar de esto, diversos estudios han demostrado que el riesgo de desarrollar CP comienza a disminuir en un plazo de cinco años y tras 15 años de abstinencia, se reduce entre un 80 y 90%. No obstante, el riesgo nunca desaparece por completo puesto que los cambios celulares que conducen a la mutación o la predisponen a ella ya se han desarrollado. También es probable que el tabaquismo pasivo sea responsable de algunos casos de CP en no fumadores.

Desde una perspectiva ambiental (figura 3), existen varios riesgos potenciales donde la mayoría de estos se producen por exposición ocupacional. Uno de los carcinógenos más significativos es el asbesto o amianto, un silicato fibroso, empleado ampliamente gracias a su resistencia al fuego y aislamiento térmico. Este material era comúnmente utilizado en edificios residenciales o industriales; sin embargo, la exposición prolongada al asbesto se ha relacionado con el desarrollo de enfermedades graves como el mesotelioma, un tipo de cáncer que afecta el revestimiento de los pulmones (Furuya et al., 2018). Debido a sus riesgos para la salud, el uso de asbesto ha sido prohibido en alrededor de 69 países (International Ban Asbestos Secretariat [IBAS], 2025).



Figura 3. Factores de riesgo para cáncer de pulmón
Fuente: Elaboración propia utilizando Canva

En México, aún no se ha prohibido el uso de asbesto; sin embargo, la norma oficial mexicana NOM-010-STPS-2014 “Agentes químicos contaminantes del medio ambiente laboral reconocimiento, evaluación y control” (STPS, 2014) establece un umbral de exposición para el asbesto, llamado “Valor Límite de Exposición”, que permite una concentración de 0.1 fibras/cm³. También la norma oficial mexicana: NOM-125-SSA1-2016 (SSA, 2016) establece los requisitos sanitarios para el proceso y uso de asbesto. No obstante, a pesar del régimen de estas normas, no existe nivel seguro de exposición al asbesto; es por esto por lo que son importantes proyectos de ley que garanticen la salubridad de la población (Calderón, 2021).



Otros compuestos como el arsénico (utilizado en la industria de pesticidas, vidrio, pigmentos y pinturas), la radiación ionizante (minería de uranio), los haloésteres e hidrocarburos aromáticos policíclicos (industria del petróleo) aumentan la posibilidad de desarrollar CP (Weinberger et al., 2019). Asimismo, se recalcan factores críticos para el desarrollo de CP, como son la exposición al humo de leña para cocinar, la exposición al gas radón y la exposición a la radiación proveniente de equipos médicos como la toma de radiografías torácicas o las tomografías y cirugías previas en el pulmón (Malhotra et al., 2016).

En los últimos años se ha incrementado la investigación acerca del papel de los microplásticos en el desarrollo de cáncer, debido a que desencadenan la proliferación celular descontrolada y provocan el crecimiento de tejidos, lo que provoca diversos cánceres, entre ellos CP (Goswami et al., 2024).

La contaminación del aire también está relacionada con el desarrollo del cáncer (Hoek et al., 2026). Los agentes contaminantes son generados por la combustión de combustibles fósiles, incluidos carcinógenos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales como el arsénico, el níquel y el cromo. En consecuencia, incluso los carcinógenos presentes en el aire en bajas concentraciones son motivo de preocupación como factor de riesgo para el cáncer de pulmón en grandes poblaciones. También es importante mencionar el material particulado (PM) como factor de riesgo potencial en el CP, siendo las partículas de mayor riesgo las de $< 2,5$ micras (μm) de diámetro (Weinberger et al., 2019).

Entre los factores genéticos potencialmente relevantes se destacan principalmente las enzimas del citocromo P450; estas enzimas pueden desempeñar un papel en la conversión de los componentes del humo de cigarrillo en carcinógenos potentes, por lo que el incremento o la expresión de la enzima puede estar asociado a un mayor riesgo de desarrollar CP (Weinberger et al., 2019). Un ejemplo es la enzima CYP2A6, en donde se ha observado la existencia de polimorfismos genéticos que han sido asociados a una diferente susceptibilidad al CP (Donato, 2004).

Asimismo, diversas variantes hereditarias raras del EGFR se han asociado con el riesgo de cáncer de pulmón, ya que este gen codifica el receptor del factor de crecimiento epidérmico, una proteína presente en la membrana celular que regula el crecimiento y la división celular (Cheng et al., 2019). Aunque no se ha confirmado el mecanismo a través del cual estas variantes aumentan el riesgo de enfermedad, una posibilidad podría ser que la mutación cause inestabilidad genética que predispone a las células a mutaciones somáticas y oncogénesis; por ejemplo, la variante T790M en EGFR es tanto una variante de la línea germinal asociada con el cáncer de pulmón como una variante somática importante con implicaciones para el tratamiento (Prudkin et al., 2009). El riesgo se eleva significativamente cuando existen



antecedentes familiares directos, especialmente si hay múltiples diagnósticos en el núcleo familiar (Lebrett et al., 2021).

Epidemiología

En la actualidad, el cáncer es uno de los mayores retos en salud pública, posicionándose en los primeros sitios como causa de mortalidad a nivel mundial. En México, durante las décadas de 1960 y 1970, el cáncer ocupaba el sexto lugar entre las causas de muerte, ascendiendo al quinto puesto una década después (Reynoso Noverón & Torres-Domínguez, 2018).

Según el INEGI, en 2023, el cáncer se posicionó como la tercera causa de fallecimiento en el país, con un total de 91 682 casos, siendo el 47.61% hombres y 52.39% mujeres. La tasa de defunciones por tumores malignos presentó un aumento de 1.3 unidades respecto a 2022. Al clasificar los casos por grupo de edad, el 88.05% de los casos de cáncer ocurre en personas de 45 años o más, con una concentración significativa en el grupo de 65 años en adelante, que representa el 55.16% de los casos.

En la Figura 4 se observa de manera gráfica la defunción por tumores malignos en México por estado. Las entidades federativas que presentaron las mayores tasas no estandarizadas por cada 100 mil habitantes fueron: Ciudad de México, con 95.2; Colima, con 82.8, y Sonora, con 82.6. Las más bajas corresponden a Quintana Roo, con 49.4; Guerrero, con 52.0, y Tlaxcala, con 58.8. Al considerar las tasas estandarizadas, la mayor se presentó en Chihuahua, con 86.4, y la menor, en Guerrero, con 51.1.

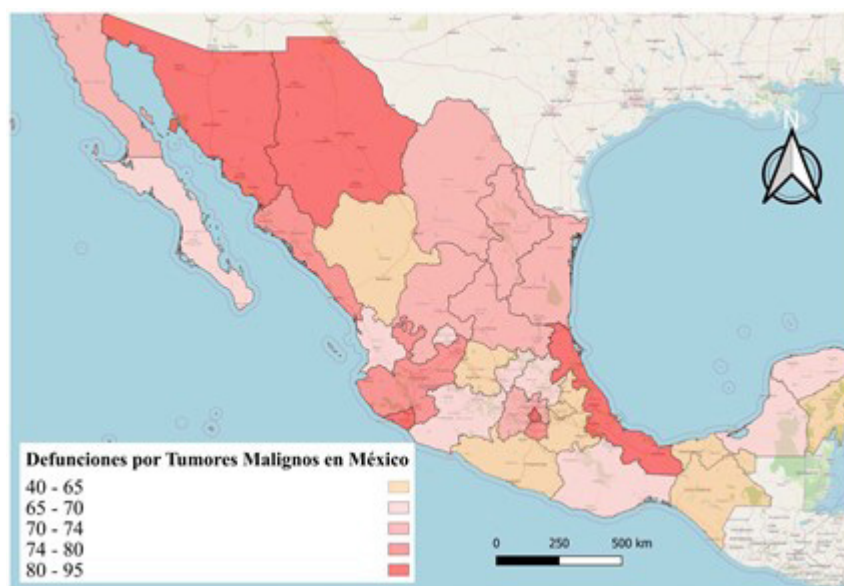


Figura 4. Defunciones por tumores malignos en México por estado (por cada 100 mil habitantes)
Fuente: INEGI 2023.



El cáncer de pulmón (CP) es la principal causa de mortalidad por cáncer en todo el mundo (Schabath & Cote, 2019) y representa el 8.1 % de las muertes anuales relacionadas con el cáncer en México, según Globocan en 2022. En México, los cánceres con mayor índice de mortalidad al año son, en primer lugar, el cáncer colorrectal (8 283), seguido por el cáncer de mama (8 195) y, en tercer lugar, el cáncer de pulmón con 7 808 casos de defunciones, de los cuales el 61.7% de casos son en hombres y un 38.3% en mujeres. En cuanto a incidencia, el cáncer de mama se encuentra en primer lugar (31 043), seguido del cáncer de próstata (26 565), y en tercer lugar se encuentra el cáncer colorrectal (16 082). El cáncer de pulmón, por su parte, ocupa el noveno lugar con 8 257 casos en total (International Agency for Research on Cancer [IARC], 2022).

Estos datos ilustran la magnitud de la situación del cáncer en México, que ha presentado un comportamiento ascendente a lo largo de los años, con consecuencias colaterales como la carga económica y social para el sistema de salud, así como para los pacientes y sus familias. Por lo tanto, es crucial implementar medidas para enfrentar este desafío, como el establecimiento de registros nacionales basados en la población que permitan el uso de estos datos en investigación. Asimismo, es necesario desarrollar nuevas propuestas interinstitucionales para abordar el creciente índice de mortalidad (Reynoso Noverón & Torres-Domínguez, 2018; Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2023).

Métodos de diagnóstico

La mayoría de los casos de cáncer de pulmón se detectan en etapa avanzada debido a la ausencia de síntomas tempranos evidentes. El diagnóstico temprano del cáncer de pulmón sigue siendo un desafío porque la mayoría de las técnicas y metodologías disponibles actualmente en uso pueden detectar el cáncer en etapas avanzadas, cuando el tratamiento y la cura no son eficaces para controlar la enfermedad. Un diagnóstico temprano es esencial para aumentar el pronóstico de vida del paciente, especialmente en poblaciones de alto riesgo, como fumadores o personas expuestas a humos, campos petrolíferos o lugares de trabajo tóxicos. El diagnóstico preciso es fundamental para seleccionar el tratamiento más adecuado y personalizado para cada paciente, maximizando las posibilidades de una terapia eficaz (Hammerschmidt & Wirtz, 2009; Nooreldeen & Bach, 2021).

Los estudios por imagen que se utilizan para detectar cáncer de pulmón emplean ondas sonoras, rayos X, campos magnéticos o sustancias radiactivas para obtener una imagen del interior del cuerpo. Este estudio permite encontrar áreas sospechosas que podrían ser cancerosas, saber hasta dónde se ha propagado el cáncer y ayudar a determinar la eficiencia del tratamiento y localizar posibles signos después del tratamiento. Los más usados son radiografía de pecho, tomografía computarizada,



imágenes por resonancia magnética y tomografía por emisión de positrones (Noor-udeen, R., & Bach, H. (2021).

El diagnóstico de CP se basa principalmente en el análisis morfológico de las células pulmonares. Estas se pueden obtener por una citología del esputo, que es la mucosidad de los pulmones que sale al toser, toracocentesis, en donde se extrae líquido alrededor de los pulmones, o mediante una biopsia, usando una aguja o por medio de cirugía (Jain & Roy-Chowdhuri, 2018). En la Figura 5 se ilustran los principales métodos diagnósticos utilizados en el cáncer de pulmón.

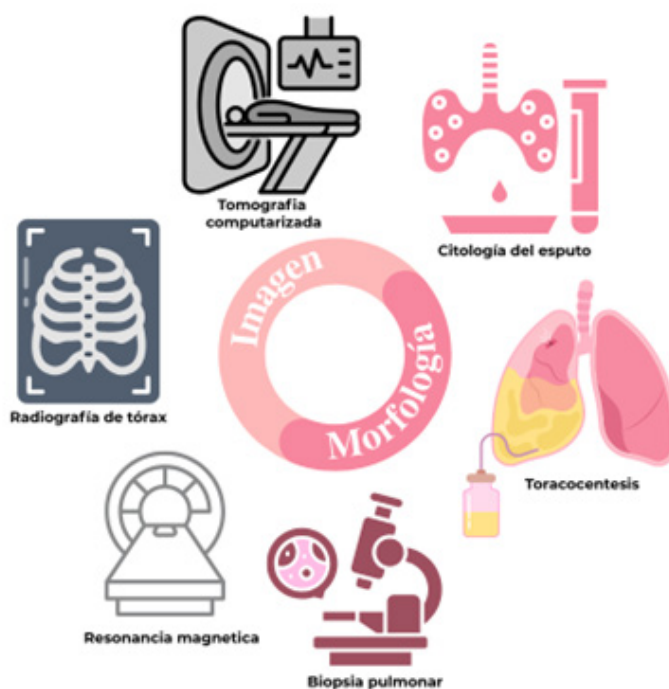


Figura 5. Métodos de diagnósticos del cáncer de pulmón
Fuente: Elaboración propia utilizando Canva

La patología molecular aparece como un campo interdisciplinario que combina la biología molecular y la patología, para analizar ácidos nucleicos y proteínas con el objetivo de diagnosticar, predecir y estipular el pronóstico de la enfermedad, con el fin de guiar el tratamiento de manera más precisa y efectiva. Estos avances han transformado la medicina, especialmente el diagnóstico, ya que hacen posible detectar las alteraciones en los genes causantes de enfermedades, tanto en los fluidos corporales como en tejidos, ofreciendo un enfoque más personalizado a su tratamiento. Además, el análisis de estas variaciones genéticas permite realizar un pronóstico de si la terapia proporcionada será efectiva o causará efectos secundarios. Todo esto es posible gracias al desarrollo de técnicas altamente sensibles como la reacción en cadena de polimerasa (PCR), hibridación fluorescente *in situ* (FISH), la secuenciación de nueva generación y la espectrofotometría de masas, entre otras (Bluth, 2013).



Diagnóstico molecular

Desde su descubrimiento en 1869, el ADN ha marcado un hito en la historia. La evolución tecnológica que hizo posible la secuenciación del genoma se resume en la figura 6. La PCR o reacción en cadena de la polimerasa es una técnica que permite la amplificación de millones a miles de millones de un segmento de ADN; este proceso se lleva a cabo mediante ciclos repetidos de desnaturalización, alineación y extensión. Existen varias técnicas, como la secuenciación de nueva generación (NGS), en la que la PCR juega un papel indispensable (Zhu et al., 2020).

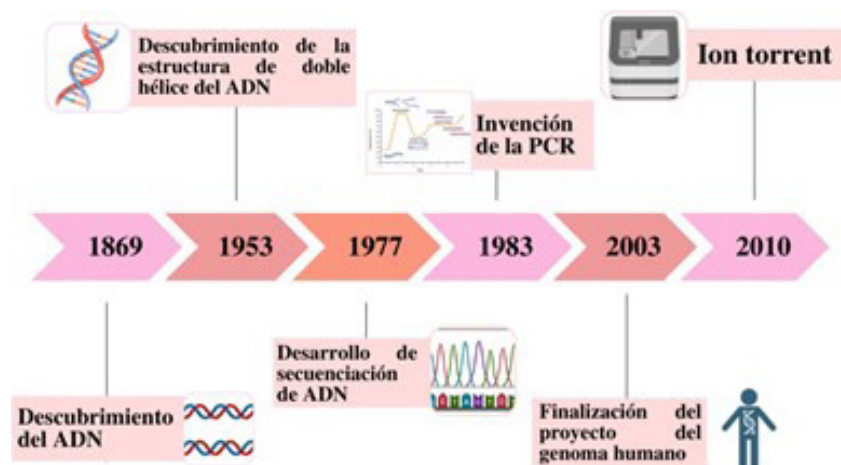


Figura 6. Línea de tiempo para el desarrollo de la secuenciación de nueva generación

Fuente: Elaboración propia utilizando Canva

Las tecnologías moleculares que se han desarrollado en los últimos años, especialmente la NGS, son una herramienta poderosa que permite la secuenciación de miles de millones de moléculas simultáneamente. Este procesamiento masivo genera volúmenes de datos importantes cuya interpretación bioinformática es fundamental (Hu et al., 2021). Dicho análisis ha transformado la búsqueda de tratamientos para enfermedades de alta complejidad y mortalidad, como el cáncer (Mok, 2011).

La secuenciación del ADN es un método para determinar el orden exacto de aparición de los nucleótidos de una región. El primer método de secuenciación, llamado secuenciación de Sanger, fue desarrollado en 1975. Sin embargo, debido a las limitaciones en el rendimiento, la velocidad y la escalabilidad, el método de secuenciación de nueva generación (NGS) fue desarrollado para satisfacer la alta demanda de tecnología de análisis masivo a un precio más bajo y con mayor rapidez (Zhu et al., 2020; Raza & Ahmad, 2016).

El fundamento de NGS es similar a la secuenciación de Sanger, su innovación se encuentra en permitir una secuenciación paralela masiva, donde millones de fragmentos de ADN de una única muestra se secuencian de manera precisa (Raza & Ahmad, 2016). El secuenciador Ion Torrent de Life Technologies fue lanzado



en 2010 y utiliza la secuenciación por síntesis y PCR en emulsión. A diferencia de otros métodos, este no utiliza fluorescencia; detecta la liberación de iones H^+ durante la incorporación de las bases nitrogenadas. Se puede observar en la figura 7 los pasos principales del flujo de trabajo en el Ion Torrent de manera gráfica, que a continuación se describen en detalle (Ion Torrent, s. f.).

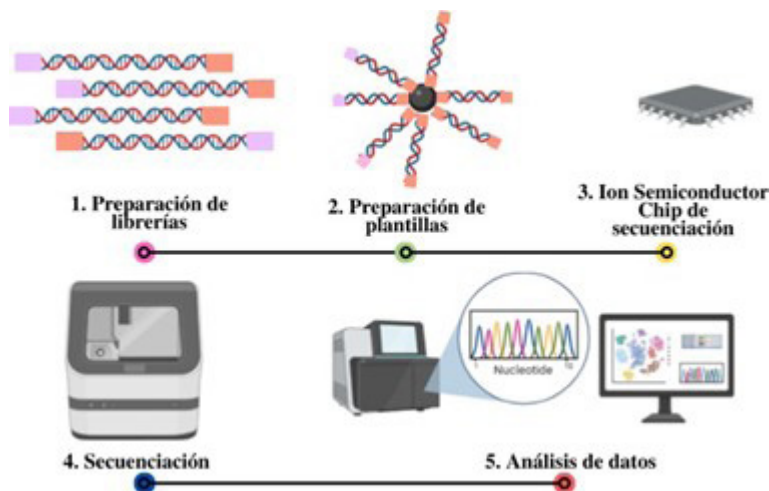


Figura 5. Representación esquemática del flujo de trabajo de secuenciación de Ion Torrent

Fuente: Elaboración propia. Created with BioRender.com

El proceso comienza con la creación de una biblioteca de secuenciación mediante la fragmentación del ADN y la adición de adaptadores específicos. La amplificación clonal se logra mediante un método basado en microesferas sobre partículas (Ion Sphere) en un micro pozo, a través de PCR en emulsión. En este proceso se ligan secuencias de adaptadores a fragmentos de ADN y se capturan posteriormente en una gota de emulsión de agua en aceite (micela), junto con una microesfera cubierta con adaptadores complementarios, desoxirribonucleótidos (dNTPs), cebadores y ADN polimerasa. Cada micela funciona como un micro reactor de PCR, haciendo que la amplificación ocurra de manera independiente (Hu et al., 2021). El núcleo de esta tecnología es un chip semiconductor (CMOS) compuesto por una cámara de flujo y sensores de pH. En este sistema, las micelas se depositan en micro pozos que son inundados secuencialmente con nucleótidos (A, T, G, C) (Hu et al., 2021).

El mecanismo de lectura es directo: cuando un nucleótido se incorpora a la cadena de ADN, se libera un ión de hidrógeno como subproducto natural de la polimerización. El sensor detecta inmediatamente este cambio de pH y lo traduce en una señal digital, eliminando la necesidad de escáneres ópticos (Ion Torrent, s. f.). Este flujo de trabajo, implementado en plataformas como Ion GeneStudio S5 o Genexus, permite generar y analizar datos genómicos de manera rápida y eficiente (Hu et al., 2021).



El análisis molecular de los tumores pulmonares ha permitido el desarrollo de terapias dirigidas que se enfocan en alteraciones genéticas específicas. Ejemplos destacados incluyen inhibidores de tirosina quinasa como gefitinib y erlotinib, dirigidos contra mutaciones en EGFR, así como crizotinib, diseñado para pacientes con reordenamientos en ALK (Quinada del linfoma anaplásico). Estas terapias han revolucionado el tratamiento del cáncer de pulmón, ofreciendo opciones más efectivas y menos tóxicas para ciertos subgrupos de pacientes (Mok, 2011).

La secuenciación de nueva generación está mejorando de manera significativa la comprensión de las anomalías genéticas que provocan la transformación de células normales en células malignas. Las compañías farmacéuticas están desarrollando medicamentos para atacar los cambios que impulsan la proliferación y supervivencia de células cancerígenas, identificando qué tumores responden a los tratamientos de manera particular (Harris & McCormick, 2010).

Impacto del cáncer de pulmón

A pesar de que el análisis molecular y las nuevas tecnologías han permitido la mejora en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades tan mortales como el cáncer. México es un país con una inversión en salud baja. El sistema de salud mexicano se divide en el sector público y privado, con un 93% de la población tratada en instalaciones financiadas con fondos públicos. Esta incluye el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), que cubre al 50% de la población, el Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE). Se estima que solo el 7% de la población tiene un seguro del sector privado.

Un reto importante vinculado con la segmentación y fragmentación del sistema de salud público en México es la diferencia en la cobertura ofrecida por los distintos esquemas de aseguramiento. Esta situación refleja una evidente inequidad en los tratamientos disponibles. Por un lado, el esquema destinado a la población sin seguridad social no contempla los tratamientos necesarios para el cáncer, lo que obliga a financiarlos por sí mismos. Por otro lado, incluso dentro de los subsistemas que atienden a trabajadores con empleo formal existen diferencias en cuanto a las pruebas diagnósticas y medicamentos ofrecidos (Charvel et al., 2019).

La mayoría de los pacientes vive en zonas con poca accesibilidad, que carecen de equipo médico y especialistas en el campo necesario para evaluar la enfermedad, por lo que muchos se ven forzados a desplazarse para recibir atención y tratamiento. Se estima que el 40% de los especialistas oncólogos se encuentra en Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey (Arrieta et al., 2019). Los pacientes en México casi nunca tienen acceso a terapias dirigidas de tercera generación, debido a las



severas restricciones de costos. Es por esto que terapias como la radioterapia son importantes para el tratamiento y diagnóstico de CP; sin embargo, el acceso a este aún sigue siendo una limitante. El IMSS ofrece atención de la salud a 74 millones de mexicanos, pero en 2018 solo había 35 aceleradores lineales (LINAC) en el país, y se concentraron en nueve estados, dejando los otros 23 estados sin equipo para esta modalidad de tratamiento.

La prevención en el cáncer es crucial, disminuyendo los factores de riesgo como el tabaco en el caso del pulmón, modificando el estilo de vida y evitando la exposición a la radiación. Las personas con antecedentes de cáncer deben tener mayor precaución y ser asesoradas para un seguimiento. Para poder tener un mayor control sobre el cáncer, es necesario mejorar la planeación de los servicios de salud en todos los niveles, desarrollando una cultura en base a la prevención y el cambio hacia las conductas de riesgo para el desarrollo de alguna neoplasia maligna. Si no se elabora, esto seguirá el mismo patrón que ha llevado a un diagnóstico tardío, altos costos, falta de recursos y alta mortalidad (Reynoso Noverón & Torres-Domínguez, 2018).

Conclusiones

El cáncer de pulmón en México es mucho más que una estadística de mortalidad; representa un profundo desafío de salud pública. Si bien existen factores como el tabaquismo, donde la decisión personal juega un rol clave, persisten riesgos silenciosos como la exposición al humo de leña y al asbesto que continúan vulnerando a grandes sectores de nuestra población sin que estos puedan evitarlo. Ante este panorama, la llegada de la patología molecular y tecnologías como la NGS han permitido dejar atrás la era de los tratamientos genéricos para transitar hacia la medicina de precisión. Entender el perfil genético de un tumor ha dejado de ser un lujo académico para convertirse en una necesidad clínica, siendo la única vía para ofrecer terapias que realmente mejoren la calidad y esperanza de vida de los pacientes. Sin embargo, estos avances científicos chocan con una realidad institucional difícil. La fragmentación del sistema de salud y la falta de recursos crean una brecha dolorosa donde el acceso a estas tecnologías sigue siendo escaso. Por tanto, el futuro del manejo de esta enfermedad en el país requiere un esfuerzo conjunto: mientras que a nivel individual es vital promover la toma de decisiones conscientes y la prevención informada, a nivel colectivo es urgente construir un sistema más justo.

Referencias

Arrieta, O., Zatarain-Barrón, Z. L., Aldaco, F., Barrón, F., Báez-Saldaña, R., Campos-Gómez, S., Trejo, R., & De la Garza, J. (2019). Lung cancer in Mexico.



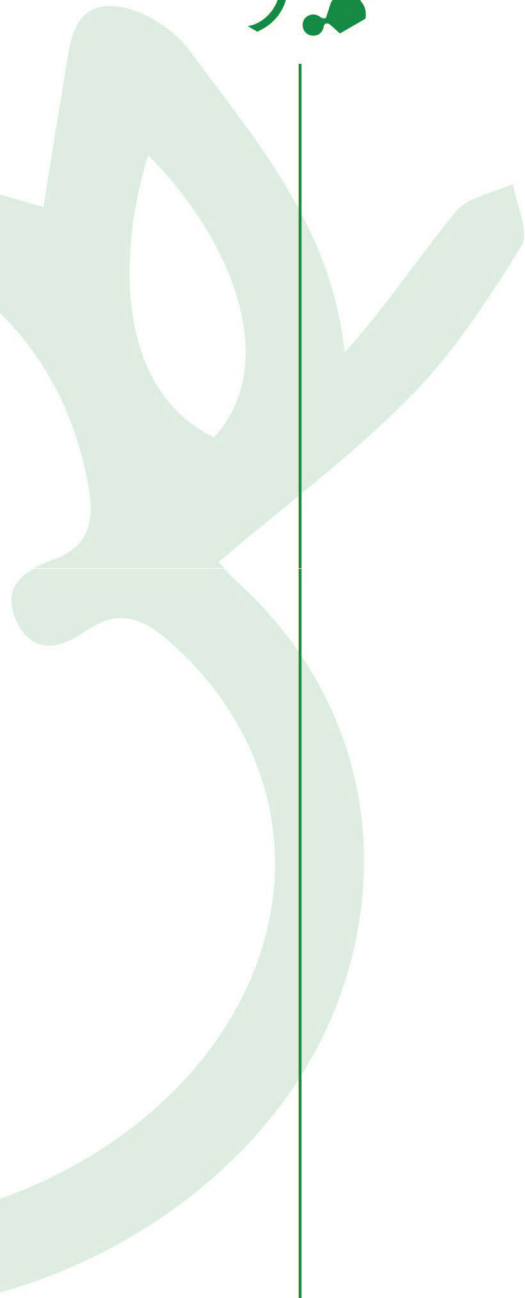
- Journal of Thoracic Oncology*, 14(10), 1695-1700. <https://doi.org/10.1016/j.jtho.2019.05.018>
- Bluth, M. H. (2013). Introduction: The impact of molecular pathology on the practice of pathology. *Clinics in Laboratory Medicine*, 33(4), 749-751. <https://doi.org/10.1016/j.cll.2013.09.002>
- Brown, J. S., Amend, S. R., Austin, R. H., Gatenby, R. A., Hammarlund, E. U., & Pienta, K. J. (2023). Updating the definition of cancer. *Molecular Cancer Research*, 21(11), 1142. <https://doi.org/10.1158/1541-7786.MCR-23-0411>
- Calderón, F. A. M. (2021). Manifest: Urgent call to ban the use of asbestos in Mexico / Manifiesto: Llamado urgente para prohibir el uso del asbesto en México. *Revista de Investigación en Salud en el Trabajo*, 4(6), 19-29. <https://rist.zaragoza.unam.mx/index.php/rist/article/view/325>
- Charvel, S., Cobo-Armijo, F., Hernández-Ávila, M., Reynales-Shigematsu, L. M., Salas, J., Arrieta, O., Santillán-Doherty, P., Roldán-Xopa, J., Pérez-Cuevas, R., Escudero-de los Ríos, P. M., & Segú-Tolsa, J. L. (2019). Necesidades de cobertura y atención del cáncer pulmonar en México. *Salud Pública de México*, 61(3), 339. <https://doi.org/10.21149/10114>
- Cheng, Y. I., Gan, Y. C., Liu, D., & Chen, Y. (2019). Potential genetic modifiers for somatic EGFR mutation in lung cancer: a meta-analysis and literature review. *BMC Cancer*, 19, 1068. <https://doi.org/10.1186/s12885-019-6317-6>
- Christiani, D. C. (2021). Ambient air pollution and lung cancer: Nature and nurture. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 204(7), 752-753. <https://doi.org/10.1164/rccm.202107-1576ed>
- Donato, M. T. (2004). ¿Qué es el citocromo P-450 y cómo funciona? *Monografías de la Real Academia Nacional de Farmacia*. <http://bibliotecavirtual.ranf.com/>
- Furuya, S., Chimed-Ochir, O., Takahashi, K., David, A., & Takala, J. (2018). Global asbestos disaster. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5), 1000. <https://doi.org/10.3390/ijerph15051000>
- Ginsberg, M. S., Grewal, R. K., & Heelan, R. T. (2007). Lung cancer. *Radiologic Clinics of North America*, 45(1), 21-43. <https://doi.org/10.1016/j.rcl.2006.10.004>
- Goswami, S., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Agarwal, R., Ganguly, A., Nanda, S., & Rajak, P. (2024). The alarming link between environmental microplastics and health hazards with special emphasis on cancer. *Life Sciences*, 355, 122937. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2024.122937>
- Gridelli, C., Rossi, A., Carbone, D. P., Guarize, J., Karachaliou, N., Mok, T., Petrella, F., Spaggiari, L., & Rosell, R. (2015). Non-small-cell lung cancer. *Nature Reviews Disease Primers*, 1(1), 15009. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2015.9>



- Hahn, W. C., & Weinberg, R. A. (2015). Cancer: A genetic disorder. En *The Molecular Basis of Cancer* (4.^a ed., pp. 3-18.e1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-4066-6.00001-9>
- Hammerschmidt, S., & Wirtz, H. (2009). Lung cancer: Current diagnosis and treatment. *Deutsches Ärzteblatt International*, 106(49), 809.
- Harris, T. J. R., & McCormick, F. (2010). The molecular pathology of cancer. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 7(5), 251-265. <https://doi.org/10.1038/nrclinonc.2010.41>
- Hoek, G., van Tongeren, M., Röösli, M., Jochems, S. H. J., Vilahur, N., Albin, M., Baldi, I., Crowley, Q., Fervers, B., Greinert, R., Consonni, D., Feliu, A., Zeeb, H., Schüz, J., D'Souza, E., Ritchie, D., Espina, C., & Kromhout, H. (2026). European Code Against Cancer, 5th edition - outdoor and indoor air pollution and cancer. *Molecular Oncology*, 20(1), 81-95. <https://doi.org/10.1002/1878-0261.70184>
- Hu, T., Chitnis, N., Monos, D., & Dinh, A. (2021). Next-generation sequencing technologies: An overview. *Human Immunology*, 82(11), 801-811. <https://doi.org/10.1016/j.humimm.2021.02.012>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). *Estadísticas de defunciones registradas (EDR) 2023*. <https://www.inegi.org.mx/temas/mortalidad/>
- International Agency for Research on Cancer. (s. f.). *Global Cancer Observatory*. Recuperado el 22 de septiembre de 2024, de <https://gco.iarc.fr/>
- International Ban Asbestos Secretariat. (2025, 29 de septiembre). *Current asbestos bans*. https://ibasecretariat.org/alpha_ban_list.php
- Jain, D., & Roy-Chowdhuri, S. (2018). Molecular pathology of lung cancer cytology specimens: A concise review. *Archives of Pathology & Laboratory Medicine*, 142(9), 1127–1133. <https://doi.org/10.5858/arpa.2017-0444-RA>
- Lebrecht, M. B., Crosbie, E. J., Smith, M. J., Woodward, E. R., Evans, D. G., & Crosbie, P. A. (2021). Targeting lung cancer screening to individuals at greatest risk: the role of genetic factors. *Journal of Medical Genetics*, 58(4), 217-226.
- Malhotra, J., Malvezzi, M., Negri, E., La Vecchia, C., & Boffetta, P. (2016). Risk factors for lung cancer worldwide. *European Respiratory Journal*, 48(3), 889-902.
- Moctezuma Velasco, C. R., & Zarco, M. P. (2009). Cáncer de pulmón. *Anales de Radiología México*, 8(1), 33–45.
- Mok, T. S. K. (2011). Personalized medicine in lung cancer: what we need to know. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 8(11), 661-668. <https://doi.org/10.1038/nrclinonc.2011.126>
- Nooreldeen, R., & Bach, H. (2021). Current and future development in lung cancer diagnosis. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16), 8661. <https://doi.org/10.3390/ijms22168661>



- Prudkin, L., Tang, X., & Wistuba, I. I. (2009). Germ-line and somatic presentations of the EGFR T790M mutation in lung cancer. *Journal of Thoracic Oncology*, 4(1), 139-141. <https://doi.org/10.1097/JTO.0b013e3181915f92>
- Raza, K., & Ahmad, S. (2016). *Principle, analysis, application and challenges of next-generation sequencing: a review*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1606.05254>
- Reynoso Noverón, N., & Torres-Domínguez, J. A. (2018). Epidemiología del cáncer en México: carga global y proyecciones 2000-2020. *Revista Latinoamericana de Medicina Conductual*, 8(1), 9. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/rlmc/article/view/65111>
- Schabath, M. B., & Cote, M. L. (2019). Cancer progress and priorities: Lung cancer. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 28(10), 1563-1579. <https://doi.org/10.1158/1055-9965.epi-19-0221>
- Thermo Fisher Scientific. (s. f.). *Ion AmpliSeq DNA and RNA libraries*. Recuperado el 29 de noviembre de 2024, de https://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/cms_094273.pdf
- Weinberger, S. E., Cockrill, B. A., & Mandel, J. (2019). Lung Cancer. En S. E. Weinberger, B. A. Cockrill, & J. Mandel (eds.), *Principles of Pulmonary Medicine* (pp. 259-269). Elsevier.
- Zhu, H., Zhang, H., Xu, Y., Laššáková, S., Korabečná, M., & Neužil, P. (2020). PCR past, present and future. *BioTechniques*, 69(4), 317-325. <https://doi.org/10.2144/btn-2020-0057>



NÚMERO ESPECIAL:

Fuentes alternativas de ingredientes funcionales iberoamericanos
para una alimentación sostenible







FUENTES ALTERNATIVAS DE INGREDIENTES
FUNCIONALES IBEROAMERICANOS PARA UNA
ALIMENTACIÓN SOSTENIBLE





Contenido de kaempferol en tejidos de huauzontle cultivado bajo condiciones de salinidad por NaCl

Kaempferol Content in Huauzontle Tissues Cultivated Under NaCl-Induced Salinity Conditions

Jeanette Guadalupe Cárdenas-Valdovinos¹, Eréndira Esmeralda Hernández-Andrade^{2*}, César Omar Montoya-García³

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Unidad Michoacán, Instituto Politécnico Nacional. Justo Sierra Ote. #28, Centro, Jiquilpan de Juárez, Michoacán, México, 59510.

² Laboratorio de Nutrición Vegetal. Departamento de Edafología, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Campus Montecillo, Texcoco 56264, Estado de México.

³ Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora. Academia de Horticultura, y Estadística. Km. 21 Carretera Hermosillo-Bahía Kino, 83000 Hermosillo, Sonora, México

*Autor de correspondencia: hernandez.erendira@gmail.com

Palabras clave:

quelite, flavonoides, actividad antioxidante, Amaranthaceae, estrés abiótico.

Keywords:

quelite, flavonoids, antioxidant activity, Amaranthaceae, abiotic stress.

Resumen

El objetivo fue evaluar kaempferol en hojas e inflorescencias de huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*) cultivado bajo condiciones de salinidad, así como la concentración de Na⁺ y K⁺. El experimento se realizó en invernadero con tratamientos de 0, 100, 200 y 300 mM NaCl, bajo un diseño de bloques completamente al azar con 12 repeticiones, utilizando semillas originarias de Puebla. Los extractos metanólicos se analizaron mediante cromatografía en capa fina de alta resolución (HPTLC). Los resultados confirmaron mayores concentraciones de kaempferol en hojas (0.407–0.456 mg g⁻¹ PS) que en inflorescencias (0.180–0.241 mg g⁻¹ PS). En hojas, el contenido se mantuvo estable, pese al incremento de Na⁺. En inflorescencias, el aumento de NaCl se asoció con menor contenido de kaempferol. Se detectaron bandas adicionales con actividad antioxidante. Estos hallazgos representan el primer reporte en este quelite y evidencian diferencias tisulares en la respuesta al estrés salino.

Abstract

The objective was to evaluate the kaempferol content in leaves and inflorescences of huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*) cultivated under salinity conditions, as well as the concentration of Na⁺ and K⁺. The experiment was conducted in a greenhouse with treatments of 0, 100, 200, and 300 mM NaCl, using a completely randomized block design with 12 replications and seeds from Puebla, Mexico. Methanolic extracts were analyzed by high-performance thin-layer chromatography (HPTLC). Results confirmed higher kaempferol concentrations in leaves (0.407–0.456 mg g⁻¹ DW) compared to inflorescences (0.18–0.241 mg g⁻¹ DW). In leaves, the content remained stable despite increasing Na⁺ levels. In inflorescences, higher NaCl concentrations were associated with reduced kaempferol content. Additional bands with antioxidant activity were detected. These findings represent the first report in this quelite and reveal tissue-specific differences in response to salt stress.

Recibido: 15 de septiembre 2025

Revisado: 21 de noviembre 2025

Aceptado: 30 de diciembre 2025

Publicado: 23 de febrero 2026



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

Las plantas enfrentan distintos tipos de estrés ambiental durante su crecimiento y desarrollo, tanto en condiciones naturales como agrícolas (Seleiman et al., 2021; Mareri et al., 2022). Estos factores representan un desafío fundamental y constituyen un aspecto crítico para la agricultura y la seguridad alimentaria (Zhang et al., 2020). Entre ellos, el estrés salino es de los más frecuentes y limita de manera significativa la productividad de los cultivos, ya que induce estrés osmótico, toxicidad iónica y daño oxidativo en las células vegetales. Estas alteraciones afectan la fotosíntesis y el metabolismo celular (Zhu, 2016; Bose et al., 2017; Bryla et al., 2021). Para enfrentar estas condiciones, las plantas han desarrollado mecanismos adaptativos complejos que les permiten detectar, responder y mitigar los efectos de la salinidad. Entre ellos destacan la activación de sistemas antioxidantes, el ajuste en el transporte iónico, la modulación de redes de señalización hormonal y la reprogramación de la expresión génica. Estos procesos en conjunto sustentan una mayor tolerancia al estrés salino (Tavakkoli et al., 2010; Chandna et al., 2014; Zhu, 2016; Isah, 2019; Kumar et al., 2023). En este contexto, los metabolitos especializados sintetizados a través de las vías del ácido shikímico y fenilpropanoide desempeñan un papel relevante. Los flavonoides, en particular el kaempferol, cumplen funciones clave en la defensa y señalización frente al estrés, en el mantenimiento del equilibrio redox celular, en la protección de la integridad de las membranas y en la regulación de procesos fisiológicos relacionados con la tolerancia al estrés (Velikova & Aktas, 2007; Zhao, 2015; Wang et al., 2018). La concentración de flavonoides depende de diversos factores, entre ellos las condiciones de cultivo, el entorno de crecimiento, la etapa de desarrollo y el tejido vegetal analizado (Jan et al., 2022).

Las principales fuentes de kaempferol (mg/100 g de peso fresco) son verduras de hoja verde como espinaca y col rizada, así como hierbas aromáticas como eneldo, cebollín y estragón (Dabeek & Marra, 2019). El kaempferol presenta propiedades benéficas para la salud humana, entre ellas efectos antiinflamatorios, cardioprotectores, neuroprotectores, anticancerígenos y antialérgicos (de Moraes et al., 2024; Hussain et al., 2024). La identificación de compuestos bioactivos en plantas comestibles permite integrarlos en la dieta y establecer las condiciones que favorecen su mayor concentración. El huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*) forma parte del grupo de los quelites utilizados en Mesoamérica desde la época prehispánica (Smisor, 2020). Actualmente se consume en distintas regiones de México y se emplea en diversos platillos tradicionales (Figueredo-Urbina et al., 2021). Sus hojas e inflorescencias se consumen crudas, en decocciones o capeadas. Asimismo, estos tejidos exhiben propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y quimiopreventivas (López-Monterrubio et al., 2020; Santiago-López et al., 2023).



Diversos estudios han evaluado la concentración de fenoles en quelites, Román-Cortés et al. (2018) reportaron que, en peso fresco, el huauzontle presenta el mayor contenido de fenoles ($432.9 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) seguido de los quintoniles ($381.7 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$), los romeritos ($173.9 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) y las verdolagas ($137.9 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$). Por su parte, Martínez et al. (2013) analizaron semillas germinadas, cocidas y crudas, y observaron un incremento en el contenido de flavonoides en semillas cocidas respecto a las germinadas, con valores entre 70 y $620 \text{ } \mu\text{g GAE/g}$. Sin embargo, no se ha documentado la presencia y la concentración de estos compuestos en las inflorescencias de huauzontle bajo condiciones de salinidad. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la concentración de kaempferol en hojas e inflorescencias de huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*) cultivado bajo condiciones de salinidad por NaCl, así como la concentración de Na^+ y K^+ .

Materiales y Métodos

Condiciones del experimento

El experimento se realizó en condiciones de invernadero ($19^\circ 46'56.71 \text{ N}$ y -98.913715 O , 2232.68 m de altitud). Durante el ciclo de cultivo de junio a noviembre de 2022, las temperaturas mínimas y máximas registradas durante el desarrollo del cultivo fueron de 5 y 47°C en los meses de junio a noviembre de 2022.

Material vegetal

Se utilizaron semillas de huauzontle provenientes del estado de Puebla, las cuales se sembraron en charolas de germinación con una mezcla de perlita y peat moss como sustrato. Durante los primeros 10 días, el riego se realizó con agua potable. Posteriormente, las plántulas se irrigaron con la solución nutritiva de Steiner con una conductividad de 1 dS m^{-1} (Steiner, 1984), hasta el momento del trasplante.

Diseño de tratamientos y diseño experimental

Se usó un diseño experimental de bloques completamente al azar; las dosis evaluadas de cloruro de sodio (NaCl) : 0, 100, 200, 300 mM. Las dosis de NaCl fueron incluidas en la solución universal de Steiner (Steiner, 1984). La unidad experimental consistió en una maceta con capacidad de 12 L; se empleó como sustrato una mezcla de perlita, tezontle y espuma agrícola (1:1:1, v: v: v). Cada tratamiento tuvo 12 repeticiones.

Manejo y conducción del experimento

Las plántulas se trasplantaron cuando tuvieron hojas verdaderas y 10 cm de altura. El riego fue con la solución nutritiva de Steiner con una conductividad eléctrica (CE)



de 1 dS m^{-1} (Steiner, 1984). Después de 17 días del trasplante (ddt) se aumentó la CE a 2 dS m^{-1} , y se añadieron las dosis correspondientes 0, 100, 200, 300 mM NaCl esto originó valores de CE de 2.00, 7.81, 17.59 y 20.30 dS m^{-1} respectivamente. El pH de la solución nutritiva se mantuvo en 5.5 durante todo el ciclo del cultivo. El sistema de riego fue automatizado con goteros con adaptadores de cuatro salidas, cada una con un tubín y estaca que fueron colocados en cada bolsa. Los riegos fueron programados en función del requerimiento hídrico del cultivo.

Variables evaluadas

La cosecha de la inflorescencia se realizó cuando las panojas habían completado su formación y presentaban una estructura piramidal definida a los 86 ddt (después de 69 días del inicio de los tratamientos). En las dosis de 200 y 300 mM NaCl, la cosecha se efectuó a los 104 ddt (después de 87 días del inicio de los tratamientos). En este punto, las flores mostraban una coloración verde, por lo que se procedió al corte antes del inicio de la floración. Durante esta etapa también se recolectaron hojas tiernas de las plantas de huauzontle. Las muestras se liofilizaron para su análisis mediante HPTLC y la determinación de la concentración de Na^+ y K^+ con un equipo de espectrometría de emisión óptica de inducción por plasma acoplado (Agilent, ICP-Optical Emission Spectrometer, 725-ES; Santa Bárbara, CA, EE. UU.).

Preparación de extractos

Los extractos metanólicos se obtuvieron colocando 1 g de muestra en 10 mL de metanol, se sonicaron (60 Hz/30 min; Ultrasonic Bath PNKKODW, Rohs®) a temperatura ambiente ($25 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y en oscuridad. Los extractos fueron filtrados (Millipore®, $0.22 \text{ }\mu\text{m}$) y se almacenaron a $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en viales ámbar hasta su análisis (Gujrati et al., 2021).

Identificación y cuantificación de kaempferol por cromatografía en capa fina de alta resolución (HPTLC)

Se siguió el método descrito por Kaur & Gupta (2018) con algunas modificaciones. Las muestras (100 mg/mL) y kaempferol (100 $\mu\text{g/mL}$) se aplicaron en forma de bandas de 5 mm con el Automatic TLC Sampler 4 (ATS4, CAMAG®, Suiza) y una jeringa de aplicación de 25 μL . En una placa para HPTLC de $20 \times 10 \text{ cm}$, con una distancia entre bandas de 6 mm, distancia desde el borde inferior de 8 mm, distancia del lado izquierdo de 10.4 mm, se aplicaron 29 bandas. Los extractos etanólicos e infusiones de hojas verdes e inflorescencias de *C. berlandieri* sups. *nuttalliae* fueron aplicados por triplicado, con un volumen de aplicación de 3 μL . El volumen cons-



tante de aplicación fue de 150 nl/s. La placa se desarrolló en el Automated Developing Chamber 2 (CAMAG) con una humedad relativa de $47 \pm 2 \%$ (controlador de humedad con solución saturada de tiocianato de potasio), con una mezcla de tolueno, acetato de etilo y ácido fórmico (7:3:0.5 v:v:v). La distancia de migración fue 50 mm, y el tiempo de desarrollo fue de 20 min. Después del desarrollo, la placa fue secada con aire frío por 5 min. Después de la separación cromatográfica, la placa fue calentada en el TLC Plate Heater III (CAMAG®) a 100 °C por 5 min. Se llevó a cabo la derivatización con una solución de Productos Naturales (PN) al 1% para revelar compuestos fenólicos y flavonoides (1 g de difenilboriloxietanolamina diluido en 100 ml de metanol) en el TLC Immersion Device III (CAMAG) a una velocidad vertical de 3 cm/s. El tiempo de inmersión fue de 3 s. Asimismo, placas sometidas a las mismas condiciones fueron derivatizadas con solución metanólica de DPPH (1,1 diphenyl 2-picrylhydrazyl) para determinar actividad antioxidante en las bandas separadas (Jasprica et al., 2007). Después de la derivatización, la placa se calentó durante 3 min para retirar el exceso de solvente. Las placas fueron evaluadas mediante el TLC Visualizer Documentation System (CAMAG). Todas las imágenes fueron capturadas bajo luz blanca y luz UV a 254 nm. Los datos obtenidos fueron procesados mediante el software VisionCats (CAMAG®) versión 2.4.

Después de la derivatización y la evaluación del cromatograma bajo luz UV (254 nm), se realizó la cuantificación de kaempferol mediante la curva de calibración ($\text{kaempferol} = -6.755 \times 10^{-12}x^2 + 1.95 \times 10^{-6}x - 9.079 \times 10^{-3}$); se aplicaron cinco concentraciones de 0.1, 0.3, 0.5, 1 y 3 μl , equivalentes a 10, 30, 50, 100 y 300 μg , de kaempferol sobre la placa, los extractos metanólicos de cada tejido por triplicado.

Análisis estadístico de la información

Se analizaron las concentraciones de kaempferol en hoja e inflorescencia para determinar su varianza, y las medias se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el programa estadístico Statistical Analysis Systems (SAS) 9.1®.

Resultados y Discusión

Detección de kaempferol por HPTLC y actividad antioxidante

El análisis mediante HPTLC confirmó la presencia de kaempferol ($R_f = 0.32 \pm 0.025$) en hojas e inflorescencias de huauzontle cultivado bajo diferentes concentraciones de NaCl. Los cromatogramas obtenidos (Figura 1). validaron la técnica en términos de precisión, especificidad y linealidad. Además, la evaluación con HPTLC-DPPH permitió identificar bandas con actividad antioxidante de forma cualitativa, corres-



pondientes al kaempferol. En inflorescencias se detectó una banda adicional en $R_f=0.25$, mientras que en hojas aparecieron dos en $R_f = 0.8$ y 0.95 , lo cual sugiere la presencia de compuestos adicionales con capacidad antioxidante. La especificidad de la identificación de kaempferol se aseguró mediante la co-migración con un estándar comercial y la correspondencia de los valores de R_f .

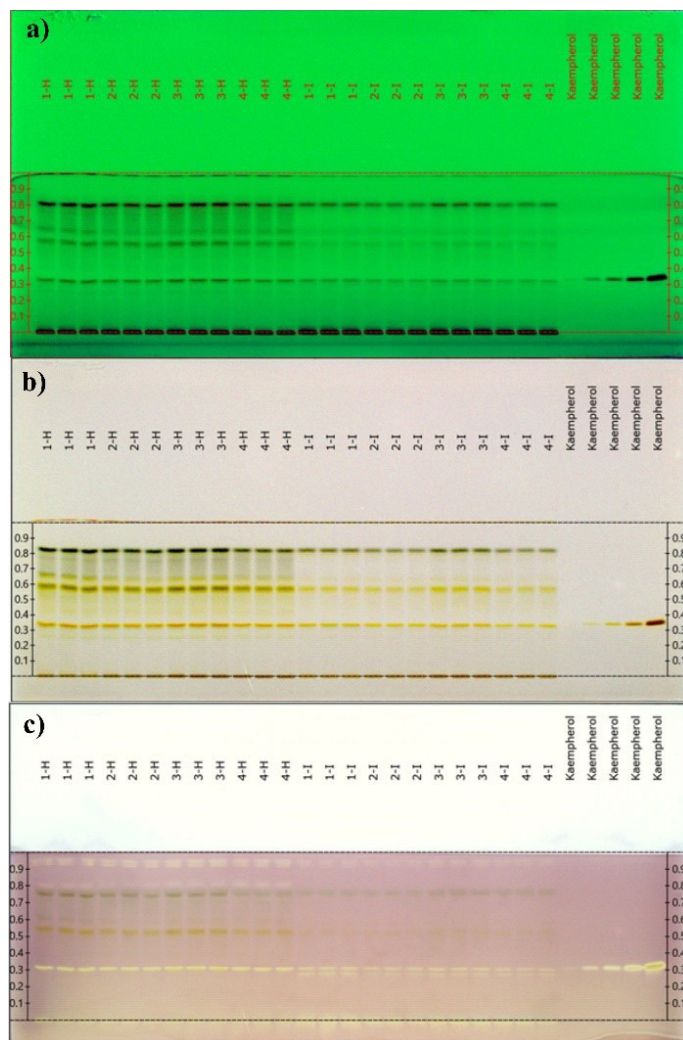


Figura 1. Cromatograma HPTLC realizado para la detección y cuantificación de kaempferol a partir de extractos metanólicos de hojas e inflorescencias de huazontle, tomados bajo luz UV (254 nm) (a) y luz blanca (b) después de la derivatización con el reactivo NP; y DPPH· (c) para la visualización de la actividad antioxidante bajo luz blanca.

En la Tabla 1 se reporta el contenido de kaempferol y la concentración de Na^+ y K^+ en hojas e inflorescencias de huazontle bajo diferentes concentraciones de NaCl . En las hojas se observó un incremento en la concentración de Na^+ , y una reducción gradual en la concentración de K^+ conforme aumenta la salinidad. En particular, la



concentración de K^+ disminuyó de 55.60 g kg^{-1} en el control a 40.59 g kg^{-1} en el tratamiento con 300 mM de NaCl . La acumulación de Na^+ en hojas, que eventualmente entran en senescencia, sugiere un mecanismo de protección frente al estrés salino, mediante el confinamiento de este ion en tejidos menos sensibles (Zhu, 2023).

La regulación de la absorción y el transporte de Na^+ bajo condiciones de salinidad se ha interpretado ampliamente como un proceso orientado a mantener una alta relación K^+/Na^+ en los tejidos, en particular a nivel citosólico. Esta relación se reconoce como un rasgo clave de tolerancia a la salinidad, debido a que el citosol concentra la mayor parte de los procesos metabólicos esenciales y requiere protección frente a los efectos tóxicos del Na^+ (Shabala y Pottosin, 2014; Assaha et al., 2017).

El contenido de kaempferol en hojas permaneció relativamente estable entre tratamientos, con valores que oscilaron entre 0.407 y 0.456 mg g^{-1} PS, sin observarse una tendencia clara asociada al incremento de la salinidad. El tratamiento con 200 mM mostró el valor más alto (0.456 mg g^{-1} PS), mientras que el de 300 mM presentó un ligero descenso (0.407 mg g^{-1} PS) respecto al control. Esta estabilidad sugiere que, ante el estrés abiótico inducido por la salinidad, las plantas activan sus sistema antioxidante, dentro del cual se incluyen los flavonoides, lo que contribuye a la tolerancia al estrés salino a través de la neutralización de radicales libres (Chandran et al., 2019).

En contraste, las inflorescencias presentaron concentraciones de Na^+ considerablemente menores que las hojas y valores de K^+ más variables entre tratamientos. La concentración de K^+ alcanzó su valor más alto en el tratamiento de 300 mM de NaCl (35.50 g kg^{-1}). En este tejido, el contenido de kaempferol fue menor, con valores que fluctuaron entre 0.180 y 0.241 mg g^{-1} PS. El control presentó el valor más elevado (0.241 mg g^{-1} PS), mientras que el tratamiento de 300 mM mostro la concentración más baja (0.180 mg g^{-1} PS), lo que indica una reducción asociada al aumento de la salinidad.

En términos generales, la salinidad no modifico de manera significativa el contenido de kaempferol en hojas; sin embargo, en las inflorescencias se observó una disminución progresiva conforme aumento la concentración de NaCl . Estos resultados indican que la acumulación de kaempferol fue mayor en hojas que en inflorescencias y que la respuesta al estrés salino depende del tipo de tejido. La estabilidad observada en hojas podría estar relacionada con la activación de mecanismos fisiológicos de tolerancia a la salinidad, entre los cuales se incluyen la limitación en la absorción de Na^+ , la restricción de su transporte hacia los tejidos aéreos, el almacenamiento en compartimentos específicos y la recirculación de ion desde los brotes hacia las raíces, mecanismos que han sido descritos previamente en *Arabidopsis* (Tian et al., 2010).



Tabla 1. Contenido de kaempferol en hojas e inflorescencias de huazontle determinado por HPTLC, y concentración de Na⁺ y K⁺ analizada por ICP

Tejido	Tratamiento	mg Kaempferol/ g PS	Na (g/kg)	K (g/kg)
Hoja	0	0.423 ± 0.014 a	0.853 ± 0.034 a	55.60 ± 0.258 a
	100	0.412 ± 0.009 a	9.142 ± 0.918 b	42.00 ± 2.529 b
	200	0.456 ± 0.157 a	14.124 ± 0.180 c	46.55 ± 2.757 b
	300	0.407 ± 0.088 a	22.93 ± 0.632 d	40.59 ± 0.286 b
Inflorescencia	0	0.241 ± 0.005 a	0.842 ± 0.009 a	21.27 ± 4.440 b
	100	0.205 ± 0.004 a	0.933 ± 0.024 a	28.68 ± 1.194 ab
	200	0.239 ± 0.083 b	0.962 ± 0.006 a	23.60 ± 2.298 b
	300	0.18 ± 0.034 b	0.694 ± 0.067 a	35.50 ± 2.184 a

Se muestran los promedios ± desviación estándar (n=9). Letras diferentes dentro de una misma columna (por tejido) indican diferencias significativas entre tratamientos (prueba de Tukey, $p \leq 0.05$).

Conclusiones

Este estudio constituye el primer reporte de la cuantificación de kaempferol en hojas e inflorescencias de huazontle bajo condiciones de salinidad. Los resultados evidencian que las hojas acumulan mayores concentraciones de este flavonoide en comparación con las inflorescencias, lo que sugiere un papel diferenciado de los tejidos en la respuesta al estrés. La reducción observada en inflorescencias bajo altas concentraciones de NaCl indica que este tejido es más sensible a la salinidad en términos de acumulación de kaempferol.

Si bien los datos no permiten establecer un patrón claro de acumulación en relación con la salinidad, la identificación de kaempferol en ambos tejidos confirma la relevancia de este metabolito en huazontle. Estos resultados sientan bases para estudios posteriores orientados a comprender la regulación del metabolismo fenólico en condiciones de estrés y explorar el valor nutracéutico de este quelite en la dieta humana.

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

- Assaha DVM, Ueda A, Saneoka H, Al-Yahyai R, Yaish MW. (2017). The Role of Na⁺ and K⁺ Transporters in Salt Stress Adaptation in Glycophytes. *Front Physiol.* 18(8),509. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00509>.
- Bose, J., Munns, R., Shabala, S., Gilliam, M., Pogson, B., & Tyerman, S. D. (2017). Chloroplast function and ion regulation in plants growing on saline soils:



- Lessons from halophytes. *Journal of Experimental Botany*, 68(12), 3129–3143. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx142>
- Bryla, D. R., Scagel, C. F., Lukas, S. B., & Sullivan, D. M. (2021). Ion-specific limitations of sodium chloride and calcium chloride on growth, nutrient uptake, and mycorrhizal colonization in northern and southern highbush blueberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 146(6). <https://doi.org/10.21273/JASHS05084-21>
- Chandran, A. K. N., Kim, J.-W., Yoo, Y.-H., Park, H. L., Kim, Y.-J., Cho, M.-H., Hong, K.J. (2019). Transcriptome analysis of rice-seedling roots under soil-salt stress using RNA-Seq method. *Plant Biotechnology Reports*, 13, 567–578. <https://doi:10.1007/s11816-019-00550-3>
- Dabeek, W. M., & Marra, M. V. (2019). Dietary quercetin and kaempferol: Bioavailability and potential cardiovascular-related bioactivity in humans. *Nutrients*, 11(10), 2288. <https://doi.org/10.3390/nu11102288>
- de Moraes, E. F., de Oliveira, L. Q. R., Farias Moraes, H. G. de, Souto Medeiros, M. R. de, Freitas, R. de A., Rodini, C. O., & Coletta, R. D. (2024). The Anticancer Potential of Kaempferol: A Systematic Review Based on In Vitro Studies. *Cancers*, 16(3), 585. <https://doi.org/10.3390/cancers16030585>
- Figueredo-Urbina, C. J., Álvarez-Ríos, G. D., Cortés Zárraga, L., Figueredo-Urbina, C. J., Álvarez-Ríos, G. D., & Cortés Zárraga, L. (2021). Edible flowers commercialized in local markets of Pachuca de Soto, Hidalgo, Mexico. *Botanical Sciences*, 100(1), 120–138. <https://doi.org/10.17129/botsci.2831>
- Gujrati, A., Jain, S., Joshi, V., Shukla, S.S., Vyas, A., Jain, V. (2021). Importance of Chromatography Techniques in Phytomedicine Research. En S.C. Mandal, R. Chakraborty, S. Sen (eds), *Evidence Based Validation of Traditional Medicines* (pp 279–297). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8127-4_14
- Hussain, M. S., Altamimi, A. S. A., Afzal, M., Almalki, W. H., Kazmi, I., Alzarea, S. I., Gupta, G., Shahwan, M., Kukreti, N., Wong, L. S., Kumarasamy, V., & Subramaniam, V. (2024). Kaempferol: Paving the path for advanced treatments in aging-related diseases. *Experimental Gerontology*, 188, 112389. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2024.112389>
- Jan, R., Asaf, S., Numan, M., Lubna, & Kim, K. M. (2021). Plant secondary metabolite biosynthesis and transcriptional regulation in response to biotic and abiotic stress conditions. *Agronomy*, 11(5), 968. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050968>



- Jan, R., Khan, M., Asaf, S., Lubna, Asif, S., & Kim, K. M. (2022). Bioactivity and Therapeutic Potential of Kaempferol and Quercetin: New Insights for Plant and Human Health. *Plants*, 11(19),2623. <https://doi.org/10.3390/plants11192623>
- Jan, R., Kim, N., Lee, S. H., Khan, M. A., Asaf, S., Lubna, Park, J. R., Asif, S., Lee, I. J., & Kim, K. M. (2021). Enhanced Flavonoid Accumulation Reduces Combined Salt and Heat Stress Through Regulation of Transcriptional and Hormonal Mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 12, 796956 <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.796956>
- Jasprica, I., Bojic, M., Mornar, A., Besic, E., Bucan, K., & Medic-Saric, M. (2007). Evaluation of antioxidative activity of croatian propolis samples using DPPH and ABTS+ stable free radical assays. *Molecules*, 12, 1006–1021. <http://www.mdpi.org>
- Kaur, N., & Gupta, R. C. (2018). Simultaneous determination of kaempferol and quercetin in *Heteropogon Contortus* (L.) Beauv. by validated high-performance thin layer chromatography. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(18), 2247–2255. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1499760>
- López-Monterrubio, D. I., Lobato-Calleros, C., Álvarez-Ramírez, J., & Vernon-Carter, E. J. (2020). Huauzontle (*Chenopodium nuttalliae* Saff.) protein: Composition, structure, physicochemical and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 108,106043. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106043>
- Mareri, L., Parrotta, L., & Cai, G. (2022). Environmental Stress and Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), 5416. MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijms23105416>
- Martínez, L. C., Vargas, M. A. P., Del Angel, A. I. C., Bermúdez, F. C., & Avalos, H. A. J. (2013). Total phenolic content and antioxidant capacity of germinated, popped, and cooked huauzontle (*Chenopodium berlandieri* spp. *nuttalliae*) seeds. *Cereal Chemistry*, 90(3). <https://doi.org/10.1094/CCHEM-03-12-0022-R>
- Román-Cortés, N.R., García-Mateos, M.R., Castillo-González, A.M., Sahagún-Castellanos, J. & Jiménez-Arellanes, M.A. (2018). Características nutricionales y nutraceuticas de hortalizas de uso ancestral en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(3), 245-253. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.245-253>
- Santiago-López, L., Almada-Corral, A., García, H. S., Mata-Haro, V., González-Córdova, A. F., Vallejo-Cordoba, B., & Hernández-Mendoza, A. (2023). Antidepressant and Anxiolytic Effects of Fermented Huauzontle, a Prehispanic Mexican Pseudocereal. *Foods*, 12(1),53. <https://doi.org/10.3390/foods12010053>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021). Drought Stress



- Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants*, 10(2), 1–25. <https://doi.org/10.3390/PLANTS10020259>
- Shabala S. & Mackay A. (2011). Ion transport in halophytes. *Advances in Botanical Research*, 57, 151–187. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387692-8.00005-9>
- Smisor, G. T. (2020). Hernández, Francisco. Historia de las plantas de Nueva España. *Tlalocan*, 1(2). <https://doi.org/10.19130/iifl.tlalocan.1943.536>
- Steiner, A.A. (1984) The Universal Nutrient Solution. *Sixth International Congress on Soilless Culture*, Wageningen, 633-650.
- Tavakkoli, E., Rengasamy, P., & McDonald, G. K. (2010). High concentrations of Na⁺ and Cl⁻ ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. *Journal of Experimental Botany*, 61(15), 4449–4459. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq251>
- Velikova, V., & Yildiz Aktas, L. (2007). *Stress-protective role of secondary metabolites: Diversity of functions and mechanisms*. <https://www.researchgate.net/publication/251847574>
- Wang, Y., Jiang, W., Li, C., Wang, Z., Lu, C., Cheng, J., Wei, S., Yang, J., & Yang, Q. (2024). Integrated transcriptomic and metabolomic analyses elucidate the mechanism of flavonoid biosynthesis in the regulation of mulberry seed germination under salt stress. *BMC Plant Biology*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04804-3>
- Xu, N., Liu, S., Lu, Z., Pang, S., Wang, L., Wang, L., & Li, W. (2020). Gene expression profiles and flavonoid accumulation during salt stress in ginkgo biloba seedlings. *Plants*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/plants9091162>
- Zhang, H., Zhao, Y., & Zhu, J. K. (2020). Thriving under Stress: How Plants Balance Growth and the Stress Response. *Developmental Cell*, 55(5). <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2020.10.012>
- Zhu, J. K. (2003). Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current Opinion in Plant Biology*, 6(5), 441–445. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00085-2)
- Zhu, J. K. (2016). Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. *Cell*, 167(2), 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>



Antinutrientes: lectinas y fenoles totales en *Phaseolus vulgaris*, *Cicer arietinum* y *Prosopis laevigata*. Un estudio comparativo

Antinutrients: lectins and total phenols in *Phaseolus vulgaris*, *Cicer arietinum* and *Prosopis laevigata*. A comparative study

Teresa Susana Herrera Flores^{1*}, María Guadalupe Moreno Contreras¹, Eva Marcela Licea de Anda¹, Alda Alejandra Arratia Castro¹

¹ Cuerpo Académico "Ciencia y Tecnología Sustentable". Ingeniería en Biotecnología. Universidad Politécnica de Pénjamo. Carretera Irapuato - La Piedad, Km 44. Predio el Derramadero. Pénjamo Gto. C.P. 36921.

*Autora de correspondencia: therrera@uppenjamo.edu.mx.

Resumen

Palabras clave:

legumbres, antinutrientes,
lectinas, fenoles.

El objetivo de este estudio fue evaluar el contenido de factores antinutricionales en especies de leguminosas: frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), garbanzo (*Cicer arietinum* L.) y vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*) para su impacto potencial en la calidad nutricional y proponer estrategias de procesamiento que minimicen sus efectos en aplicaciones alimentarias. Se evaluó el contenido de humedad, fenoles totales y lectinas con actividad hemaglutinante en harina desengrasada de las variantes de legumbres. Se presentaron diferencias estadísticas significativas en el contenido de humedad de 10.78% en frijol y garbanzo, y 6.30% en vainas de mezquite. Los fenoles totales fueron menores en vainas de mezquite con 2.9 a 3.8 EAG/100 g. Las lectinas fueron menores en vainas de mezquite y frijol. Un alimento saludable se caracteriza por los beneficios que aporta a la salud. Estas harinas y sus características las vuelven un alimento funcional; pueden ser aprovechadas por el público en general.

Abstract

Keywords:

legumes, antinutrients,
lectins, phenols.

The objective of this study was to evaluate the content of antinutritional factors in legume species: beans (*Phaseolus vulgaris* L.), chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and mesquite pods (*Prosopis laevigata*), for their potential impact on nutritional quality and to propose processing strategies that minimize their effects in food applications. The moisture content, total phenols, and lectins with hemagglutinating activity were evaluated in defatted flour from the legume variants. Statistically significant differences were found in the moisture content of 10.78% in beans and chickpeas and 6.30% in mesquite pods; total phenols were lower in mesquite pods with 2.9 to 3.8 EAG/100 g; lectins were lower in mesquite pods and beans. A healthy food is characterized by the benefits it provides to health. These flours and their characteristics make them a functional food that can be enjoyed by the general public.

Recibido: 08 de octubre 2025
Revisado: 25 de noviembre 2025
Aceptado: 30 de diciembre 2025
Publicado: 23 de febrero 2026



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

Las legumbres, como el frijol y el garbanzo, son una fuente importante de nutrientes como: proteínas, carbohidratos, vitaminas hidrosolubles, minerales, para la nutrición humana. Sus beneficios se atribuyen a la presencia de almidón de las semillas con un índice glucémico bajo, fibra dietética, varias clases de compuestos fenólicos y oligosacáridos (Vaz et al., 2015). El género *Prosopis* pertenece a la familia *Fabaceae* distribuido en regiones áridas y semiáridas de Asia, África y América. Uno de los representantes importantes del género *Prosopis* es el árbol de mezquite (*Prosopis laevigata*), que es característico de la vegetación de las regiones áridas de México y otras partes del mundo. Tiene valor socioeconómico principalmente por sus semillas, en la producción de harina y para alimentar ganado en condiciones de traspatio, además, es apreciado por sus flores y madera, así como por ser un mejorador del suelo. La harina de la vaina de *Prosopis* es un ingrediente versátil con un alto potencial para la industria alimentaria, en la elaboración de alimentos balanceados y producción de dulces similares al piloncillo y pinole (Espinosa & Huerta, 2024). Es rica en proteínas, azúcares y fibra, y no contiene gluten (Felker et al., 2013; Moreno et al., 2021).

El incremento en la demanda de legumbres a nivel mundial se debe a una concientización de los consumidores sobre sus beneficios nutricionales y para la salud, provocando así que un mayor número de personas opte por dietas basadas en sustituir proteínas animales por proteínas vegetales (Shreyas et al., 2022; Maphosa y Jideani, 2017). La proteína de las legumbres es más económica que la proteína animal, por lo que el mayor consumo de legumbres es una alternativa más adecuada para disminuir o erradicar la malnutrición proteico-calórica que se observa en los países en desarrollo (Marathe et al., 2011). Las legumbres también poseen importantes compuestos protectores de la salud como compuestos fenólicos, fosfatos de inositol y antioxidantes (Bharathi y Arun, 2014), que ayudan a mejorar el nivel de azúcar en sangre y la función general de la insulina (Jacobs & Gallahar, 2004). Pueden mejorar las funciones digestivas, mejorando así la salud del colon y disminuyendo la incidencia de cáncer (Chibbar et al., 2010). Sin embargo, compuestos antinutricionales, como los taninos, el ácido fítico, los inhibidores de proteasas y los oligosacáridos, fenoles y lectinas (hemaglutinantes) dificultan el consumo de legumbres, debido a que son metabolitos secundarios que disminuyen la ingesta, la digestión, la absorción y el consumo de nutrientes, además de causar diversos efectos negativos si se consumen frescos, y pueden causar efectos fisiológicos adversos en los seres humanos (Aniket et al., 2021). Los antinutrientes se clasifican en termoestables: antigénicos, oligosacáridos y aminoácidos no proteicos tóxicos, saponinas, fitatos, estrógenos y cianógenos; y termolábiles: como los inhibidores de proteasas



(tripsina y quimotripsina), lectinas, goitrogenos y antivitaminas (Abbas & Ahmad, 2018; Aniket et al., 2021). La concentración puede variar entre las legumbres y variedades de la misma legumbre, dependiendo de la etapa de desarrollo, ubicación geográfica de producción y etapa de madurez (Awoyinka et al., 2016). Por ejemplo, los inhibidores de hidrolasas y lectinas se encuentran en mayor proporción en chícharo, lenteja, frijol, soya y alubias (Mancera et al., 2023).

Las lectinas son hemagglutininas vegetales o fitohemagglutininas (PHA); se han identificado en más de 800 variantes de la familia de las leguminosas, conformando entre un 2 y un 10% del total del contenido de proteínas de leguminosas (Sauvion et al., 2004). El principal efecto antinutricional es que provoca cambios en la permeabilidad del intestino impidiendo la absorción de los productos finales de la digestión en el intestino delgado; en el sistema inmunológico local y puede inducir la coagulación de los glóbulos rojos al afectar a los eritrocitos, por la interacción con los grupos sanguíneos (Lozada et al., 2017). Un incremento en su consumo puede provocar deficiencias nutricionales y reacciones alérgicas, principalmente por molestias gastrointestinales al interactuar con las células del epitelio intestinal (Zhang et al., 2008, citado por Misgana & Wabi 2020). Las lectinas cuentan con propiedades químicas y biológicas importantes, ya que interactúan con grupos sanguíneos específicos; realizan diversas funciones en la división mitótica, destruyen las células cancerosas, tienen efectos tóxicos en algunos animales y se emplean en estudios clínicos e inmunológicos (Thakur et al., 2019).

Los compuestos fenólicos y polifenólicos representan los metabolitos secundarios vegetales más ampliamente distribuidos y tienen un efecto benéfico como eliminadores de radicales libres y quelantes de metales prooxidantes, previniendo así la oxidación de las lipoproteínas de baja densidad y la escisión de las cadenas de ADN o mejorando la función inmunitaria. Se tiene evidencia de que estos compuestos controlan ciertos tipos de cáncer, enfermedades cardiovasculares y el proceso de envejecimiento (Pineda et al., 2021). Los polifenoles son metabolitos secundarios que se encuentran en vegetales como verduras, cereales, legumbres, frutas, frutos secos y bebidas como el té, el vino y el cacao. Las cantidades varían entre cultivares de la misma especie, por factores ambientales como la luz, la germinación, el grado de madurez, la variedad, el procesamiento y el almacenamiento, así como factores genéticos (Ahn et al., 1989, citado por Bora, 2014). Los compuestos antinutricionales tienen la capacidad de formar complejos con carbohidratos, proteínas y polisacáridos, y con enzimas implicadas en la digestión de proteínas y carbohidratos, lo que tiene un impacto importante en la nutrición debido a que interfieren en la digestibilidad de las proteínas de la dieta. Las legumbres, al contener una cantidad



considerable de compuestos antinutricionales con efecto negativo en la nutrición humana y animal, muestran la necesidad de analizar y cuantificar el contenido de compuestos antinutricionales en legumbres de importancia en nuestro país, como el garbanzo, el frijol y las vainas de mezquite. Esto es fundamental para implementar tecnologías o tratamientos de procesamiento orientados a: 1) la inactivación de compuestos antinutricionales, 2) la mejora de la biodisponibilidad de nutrientes, y 3) la elevación de sus cualidades sensoriales, factores clave para su éxito como ingredientes en programas de asistencia alimentaria y nutricional.

Materiales y Métodos

Ubicación del experimento

La presente investigación se realizó entre septiembre de 2017 y marzo de 2018, en los laboratorios de microbiología, operaciones unitarias, alimentos y biotecnología de la Universidad Politécnica de Pénjamo, localizada en Pénjamo, Guanajuato.

Material vegetal

En este estudio se consideraron tres especies de leguminosas, conformadas por tres variedades de frijol, *Phaseolus vulgaris* L. (Pinto Saltillo, Flor de Junio, Peruano), tres variedades de garbanzo, *Cicer arietinum* L. (Costa 2004, Blanoro y Blanco Sinaloa) proporcionadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) campo experimental Bajío, cosecha 2016 y vainas de mezquite, *Prosopis laevigata*, colectadas en la población de Sauz de Villaseñor, Pénjamo, y clasificadas por su estado de madurez, maduras-moradas y secas-amarillas.

Diseño experimental

El experimento utilizado fue un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones en cada uno de los materiales vegetales de frijol, garbanzo y vaina de mezquite. Las variables analizadas fueron: contenido de humedad en la harina y compuestos antinutricionales (fenoles totales y lectinas). Para cada variable se realizó un análisis de varianza y una comparación de medias de Tukey con una confiabilidad del 95%, para el análisis de los datos se empleó el software estadístico de MINITAB 17©.

Preparación de la harina

Para la preparación de la harina de frijol, garbanzo y vainas de mezquite, se realizó una desinfección para eliminar algún posible contaminante, empleando hipoclorito de sodio a 50 ppm/5 min/alcohol al 70%/30 s. Los materiales se secaron en horno



Felisa modelo FE-360 a 65 °C/4 h. Se realizó una molienda en un molino industrial marca Siemens, México, y se hizo un tamiz (No. 40 abertura 420 micrones Mont Inox, México) para obtener una harina con tamaño de partícula pequeña y homogénea (Herrera, 2014).

Cuantificación de humedad

Para la determinación de humedad se utilizaron entre 0.8 y 1.0 gramos de cada harina, en una termobalanza marca Ohaus, Mod MB35, a una temperatura de 110 °C. Se realizó por triplicado para cada material vegetal (AOAC, 2000). Los datos obtenidos por la termobalanza fueron: peso inicial (Pi), peso final (Pf), porcentaje de humedad (% de humedad) y tiempo en el cual se procesó la muestra, el porcentaje de humedad se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = [(P_i - P_f) / P_i] * 100. \quad (1)$$

Harina desengrasada y extracto proteico

La harina de frijol, garbanzo y vainas de mezquite, se desengrasaron con hexano (J.T Baker, Cat.9309-03), a una temperatura de 67°C por 4h; posteriormente se le dio un tratamiento alcalino con 0.25% de Na₂SO₃, con pH constante de 10.5, para solubilizar las proteínas. Las suspensiones se agitaron por 1 h/ 30 °C en un baño de agua (Shell LAB, Mod. Ws17 & WS27). Se centrifugaron a 10240 g por 15 min, en una centrífuga (Hermle labortechnik, Mod. Z326K, USA). El sobrenadante se acidificó con 3N de HCl al punto isoelectrico pH 4. Se centrifugó nuevamente a 10240 g por 15 min. Se recuperó el extracto proteico (Vioqué et al., 2012).

Compuestos antinutricionales - Fenoles totales

Para la obtención de fenoles totales del extracto proteico se usaron 50 mg de harina desengrasada. Se colocaron en tubos eppendorf con capacidad de 4 ml, se les agregó 1.5 ml de etanol al 95% y se mantuvieron a 20°C/48 h. Para determinar la cantidad de fenoles se realizó una curva de calibración con 25 mg de ácido gálico en 5 mL de etanol el cual se aforó a 50 mL con agua destilada, dicha solución corresponde a la solución stock de concentración 0.5 mg/mL, a una longitud de onda de 725 nm en un espectrofotómetro (Marca Thermo Scientific Modelo: G10SS UV-Vis) (Singleton et al., 1999).



Lectinas - Actividad de hemaglutinación

Para la determinación de lectinas se requiere del aislado proteico, para la hemaglutinación que se representa en unidades de hemaglutinación (HU)/g (García et al., 2009, Ma y Wang, 2010) se usaron muestras sanguíneas proporcionadas por donadores sanos; los tipos sanguíneos utilizados fueron A, B y O, con Rh positivo. Los glóbulos rojos recogidos en la solución de K2 EDTA 10.8 mg para 6.0 mL (BD Vacutainer®) se centrifugaron durante 5 min a 410 g. Para recuperar solo los eritrocitos, las muestras fueron lavadas con 1X de PBS. Las pruebas de hemaglutinación se realizaron de acuerdo a la metodología establecida por Yating y Tong (2010). Las unidades de hemaglutinación (HU) por gramo de muestra se determinaron usando la ecuación:

$$HU/g = \frac{D_B \times S}{V} \quad (2)$$

DB= Es el factor de dilución del pozo que contiene 1 HU (la última dilución que causa la aglutinación celular).

S= Son los mililitros de extracto por gramo de muestra (inversa a la concentración inicial).

V= Es el volumen de extracto agregado al primer pocillo (0.1 mL).

Resultados y Discusión

Contenido de humedad en leguminosas

Para regular la calidad de los granos, el contenido de humedad es uno de los parámetros de mayor importancia. Las harinas deben de cumplir con un cierto porcentaje de humedad, ya que podrían proliferar hongos o alguna plaga y se generaría una pérdida económica. El contenido de humedad en las harinas de frijol y vainas de mezquite debe ser de 15-19 % m/m y para garbanzo debe ser entre 14-16 % (Codex Alimentarius, 1989). En la tabla 1 se muestra que no existe significancia estadística en el contenido de humedad (%) en las harinas de las variedades de frijol; el contenido de humedad se relaciona con la edad de la semilla y el manejo postcosecha, así como con los métodos y condiciones de procesamiento. En la harina de las vainas de mezquite moradas y amarillas fue de 6.10% y 6.50%, respectivamente, lo cual muestra que, estadísticamente, son iguales, de acuerdo a los resultados obtenidos (Monroy et al., 2014). El contenido de humedad fue estadísticamente diferente a los otros grupos de variedades de leguminosas. Con respecto a las variedades de garbanzo, sí se identificaron diferencias estadísticas en el contenido de humedad con valores de 10.20% en Blanco Sinaloa en comparación con las otras dos variedades que son estadísticamente iguales con valores de 10.79% respectivamente (Tabla



1). Este comportamiento se puede deber al tipo de almacenamiento y tiempo de cosecha de cada una de las variedades de garbanzo; las propiedades biológicas de las harinas no se afectan por estar debajo de la norma, solamente se requiere una mayor absorción de agua al momento del mezclado (Jossi et al., 2011). Dentro de la cadena productiva de la agroindustria, la determinación del contenido de humedad inicia con la cosecha y continúa con las operaciones de recepción, secado, almacenamiento, transporte, transformación, empaque y disposición final al consumidor (Bianco et al., 2014).

Tabla 1. Contenido de humedad en porcentaje (%) en variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), frijol peruano, flor de junio y pinto Saltillo; variedades de garbanzo Costa 2004, blanoro y blanco Sinaloa; vainas de mezquite amarillas y moradas

	Variedades de frijol			Variedades de garbanzo			Vainas de mezquite	
	Peruano	Flor de junio	Pinto Saltillo	Costa 2004	Blanoro	Blanco Sinaloa	Amarilla	Morada
Contenido de humedad (%)	10.78±0.140 ^a	10.76±0.663 ^a	10.71±0.041 ^a	10.79±0.122 ^a	10.79±0.090 ^a	10.20 ±0.258 ^b	6.50±0.00 ^b	6.10±0.00 ^b

Valores promedio (n=3) ± desviación estándar. Las letras minúsculas denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey (p<0.05) dentro de cada variedad de legumbres estudiadas. **Fuente:** Elaboración propia.

Lectinas - actividad de hemaglutinación

Las lectinas o fitohemaglutininas son proteínas (o glicoproteínas) de origen no inmunitario que se unen a los carbohidratos y que pueden reconocer y unirse a carbohidratos simples o complejos de forma reversible y altamente específica. La cantidad de lectina en las leguminosas de grano es mayor que la de otras plantas y varía dependiendo del tipo de especie (David et al., 2024). En el aislado proteico de las variedades de frijol no se mostraron diferencias estadísticas significativas. Se usaron los tres tipos sanguíneos (A+, B+ y O+). Se cuantificaron las unidades hemaglutinantes que se encuentran presentes en las tres variedades. En el caso de Pinto Saltillo, las HU/g disminuyeron en el aislado proteico con los tres tipos sanguíneos. En flor de junio también se mostró una tendencia similar a Pinto Saltillo, y en frijol peruano se tuvo un caso contrario, las HU/g se incrementaron los tipos sanguíneos A+ y B+, mientras que con el tipo sanguíneo O+ se mantuvo en las mismas cantidades 9600 HU/g (Tabla 2).



Tabla 2. Comparación de unidades de hemaglutinación por gramo (HU/g) en extracto de las harinas y aislado proteico en los grupos sanguíneo A+, B+ y O+; conformadas en las tres variedades de harina de frijol: peruano, pinto saltillo y flor de junio

Variedad	Grupo Sanguíneo	Unidad de hemaglutinación (HU/g)	
		Extracto de Harina	Aislado Proteico
Pinto Saltillo	A+	7200±7929 ^a	6400±0.0000 ^a
	B+	8000±6788 ^a	4800±2263 ^a
	O+	38400±18102 ^a	1600±0.000 ^a
Flor de Junio	A+	14400±15839 ^a	13600±16971 ^a
	B+	38400±18102 ^a	28800±31678 ^a
	O+	54400±67882 ^a	26400±35072 ^a
Peruano	A+	9600±4525 ^a	12800±0.0000 ^a
	B+	8000±6788 ^a	57600±63357 ^a
	O+	9600±4525 ^a	9600±4525 ^a

Valores promedio (n=3) ± desviación estándar. Las letras minúsculas denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey (p<0.05) dentro de cada variedad de legumbres estudiadas.

Fuente: Elaboración propia

En las variedades de garbanzo, se identificaron diferencias significativas de Unidades de Hemaglutinación (HU/g) totales, en las variedades Blanco Sinaloa y Blanoro con valores promedio de 199467 HU/g y 136800 HU/g respectivamente, siendo mayores a Costa 2004 con 65600 HU/g. Sin embargo, en la interacción de variedades, grupos sanguíneos y tipos de harinas no se detectaron diferencias significativas en el contenido de lectinas (Tabla 3). Sin embargo, el valor más alto de HU/g fue en la variedad de Blanco Sinaloa en el extracto de la harina y en los grupos sanguíneos A+, B+ y O+ con 204800 HU/g, en el aislado proteico los valores disminuyeron solo en el tipo sanguíneo A+; y en el tipo sanguíneo B+ y O+ se mantuvieron igual. En la variedad Blanoro y Blanco Sinaloa se tuvo una tendencia similar en el extracto de harina y aislado proteico, mientras que en la variedad Costa 2004 los valores fueron inferiores en los tres tipos sanguíneos; esta tendencia se puede atribuir a los grupos sanguíneos, a la edad de los eritrocitos, que puede afectar las HU/g de cada una de las variedades.



Tabla 3. Comparación de unidades de hemaglutinación por gramo (HU/g) en extracto de las harinas y aislado proteico en los grupos sanguíneo A, B y O formados en las tres variedades de harina de garbanzo Costa 2004, Blanoro y Blanco Sinaloa

Unidad de hemaglutinación (HU/g)			
Variedad	Grupo Sanguíneo	Extracto de Harina	Aislado Proteico
Pinto Saltillo	A+	204800±0.0000 ^a	57600±63357 ^a
	B+	204800±0.0000 ^a	204800±271529 ^a
	O+	204800±144815 ^a	204800±0.0000 ^a
Flor de Junio	A+	204800±0.0000 ^a	76800±36204 ^a
	B+	204800±0.0000 ^a	204800±0.0000 ^a
	O+	115200±126714 ^a	102400±15839 ^a
Peruano	A+	128000±108612 ^a	38400±18102 ^a
	B+	7200±7920 ^a	115200±12674 ^a
	O+	2400±1131 ^a	102400±0.0000 ^a

Valores promedio (n=3) ± desviación estándar. Las letras minúsculas denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey (p<0.05) dentro de cada variedad de legumbres estudiadas. **Fuente:** Elaboración propia

El contenido de HU/g, en las vainas de mezquite, mostró diferencias significativas entre grupos de vainas, grupos sanguíneos y tipo de harinas. En las vainas de mezquite (Tabla 4) se observa que, de los dos tipos de vaina, los grupos sanguíneos contra los cuales hubo mayor actividad hemaglutinante fueron O+ y A+. viéndose la diferencia estadística significativa entre los extractos conforme a los grupos sanguíneos. La cantidad de HU/g fue mayor en el aislado proteico de las vainas moradas y amarillas, mientras que, en el extracto de harina, es marcada la diferencia estadística, ya que disminuyeron notablemente.

Tabla 4. Comparación de unidades de hemaglutinación por gramo (HU/g) en extracto de las harinas y aislado proteico en los grupos sanguíneo A+, B+ y O+ formados en los dos tipos de vainas de mezquite, vaina morada y amarilla

Unidad de hemaglutinación (HU/g)			
Tipo de Vaina	Grupo Sanguíneo	Extracto de Harina	Aislado Proteico
Vaina Morada	O+	400±0.0000 ^j	102400±0.0000 ^c
	A+	600±0.0000 ^h	128000±0.0000 ^a
	B+	400±0.0000 ⁱ	12800±0.0000 ^f



Vaina Amarilla	O+	400±0.0000 ^k	102400±0.0000 ^b
	A+	1000±0.0000 ^g	25600±0.0000 ^e
	B+	400±0.0000 ^k	51200±0.0000 ^d

Valores promedio (n=3) ± desviación estándar. Las letras minúsculas denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey (p<0.05) dentro de cada variedad de legumbres estudiadas. **Fuente:** Elaboración propia

El contenido de lectinas en el aislado proteico y en el extracto de harina fue muy similar a los valores reportados con anterioridad (Gallegos et al., 2013), teniendo una diferencia significativa en las combinaciones de vainas, tipos de extracto y grupos sanguíneos, donde las vainas moradas y el aislado proteico tienen valores medios entre 128000 y 12800 unidades de hemaglutinación mayores a los de la vaina amarilla (Tabla 4). Lo que representa una oportunidad para investigar y caracterizar nuevas materias primas que cumplan con estos requerimientos, dentro de esta búsqueda se encuentra la harina de vaina de mezquite (*Prosopis laevigata*), que estuvo por debajo de los contabilizados en frijol y garbanzo y que, además, se pueden implementar tratamientos de secado y tostado para evaluar su efecto en la cantidad de lectinas (Gallegos et al., 2013). Al corroborar que los factores antinutricionales mostraron diferencia significativa en los tipos de grupos sanguíneos, se puede decir que estas harinas y sus características que las vuelven un alimento funcional, pueden ser aprovechadas por el público en general, donde se les debe dar un tratamiento previo de remojo, cocción o tostado de la semilla (Amador et al., 2025).

Contenido de equivalentes de ácido gálico: fenoles totales en leguminosas

En la determinación de equivalentes de ácido gálico (EAG) sí se identificaron diferencias estadísticas significativas entre y dentro de las leguminosas en estudio, frijol, garbanzo y vainas de mezquite (Tabla 5). En las variedades de frijol, la cantidad de fenoles totales se observa que entre mayor sea el nivel de fenoles en frijol, se ve reflejado en su capacidad antioxidante, lo cual mejora de manera sustancial la calidad nutracéutica de una harina comercial de alto consumo en México.

Tabla 5. Contenido de g de EAG/100 g de harina en harina de variedades de frijol: peruano, flor de junio y pinto saltillo; variedades de garbanzo: costa 2004, blanoro y blanco sinaloa; y vainas de mezquite: moradas y amarillas

Variedades de frijol	g de EAG/100g de harina	Variedades de garbanzo	g de EAG/100g de harina	Vaina de mezquite	g de EAG/100g de harina
Peruano	12.21±0.595 a	Costa 2004	5.65±0.0200 c	Amarillas	2.9±0.000 e
Flor de junio	11.45±1.501 ab	Blanoro	5.57±0.0200 cd	Moradas	3.8±0.000 de
Pinto Saltillo	10.22±0.326 b	Blanco Sinaloa	5.34±0.0200 c		

Valores promedio (n=3) ± desviación estándar. Las letras minúsculas denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey (p<0.05) dentro de cada variedad de legumbres estudiadas; g de equivalentes de ácido gálico en 100 g de harina: (g de EAG/100 g). **Fuente:** Elaboración propia



La cantidad de g equivalentes de ácido gálico en 100 g de harina (g de EAG/100 g) en las variedades de frijol Peruano y Flor de Junio, 10.21 y 11.41 g de EAG/100 g de harina respectivamente, mostraron diferencias estadísticas significativas con valores superiores a Pinto Saltillo con un total de 10.22 g de EAG/100 g de harina; los cuáles varían con lo reportado por Rochin et al. (2021), donde determinaron valores entre 64.13 a 93.08 g de EAG/100 g, indicando que el contenido depende de la variedad de frijol y del tipo de leguminosa. Entre las variedades de garbanzo, no hubo diferencia significativa con datos de 5.65g de EAG en Costa 2004, 5.57 g de EAG en Blanoro, 5.34 g de EAG en Blanco Sinaloa; demostrando que el garbanzo posee bajos contenidos de fenoles totales por lo cual la formación de complejos de los fenoles totales con las proteínas y los carbohidratos serán bajos por lo tanto la interferencia con la digestibilidad será baja, siendo estadísticamente diferentes a las variantes de frijol. En las vainas de mezquite amarillas y moradas, las diferencias estadísticas fueron con las variedades de frijol y garbanzo, pero entre las vainas el contenido de g de EAG/100 g de harina fue de: 2.9 y 3.8 respectivamente, siendo estadísticamente iguales; los fenoles pueden ser funcionales o antinutricionales dependiendo del tipo, la cantidad y la referencia. Por lo tanto, las tres variedades de harina de leguminosas, podrán ser consumidas, con tratamientos de cocción, sin que cause problemas en su digestión, y además da la pauta para continuar con futuras investigaciones que nos permitan identificar si están presentes taninos, que son un grupo de polifenoles solubles en agua, forman complejos con polisacáridos y proteínas y se clasifican en taninos hidrolizables y taninos condensados (Han y Baik 2008).

La disminución del contenido de fenoles se puede atribuir a tratamientos de cocción o la a la unión establecida entre los polifenoles con otros compuestos como proteínas, por lo que se pueden utilizar en la realización de productos de valor agregado (Aguilera, 2009, Peñarrieta et al., 2014). Las diferencias en el contenido de compuestos fenólicos entre las variedades de leguminosas, se pueden atribuir a las características genéticas, propiedades físicas de los granos y particularmente a la relación de la distribución anatómica de los diferentes componentes del frijol; ya que la testa es la estructura del grano donde son sintetizados la mayoría de los compuestos fenólicos (Rochin et al., 2021). Lo más destacable de los compuestos fenólicos son sus propiedades antioxidantes. Por un lado, son muy susceptibles a ser oxidados y por otro, impiden que los metales catalicen las reacciones de oxidación (Gimeno, 2004). Al corroborar que los factores antinutricionales no obtuvieron diferencia significativa en los tipos de grupos sanguíneos, podemos concluir que estas harinas y sus características que las vuelven un alimento funcional, pueden ser aprovechadas por el público en general.



Conclusiones

De los resultados presentados, su análisis y discusión se pueden obtener las siguientes conclusiones sobre el análisis de antinutrientes en leguminosas: 1) el contenido de humedad (%), mostró diferencias estadísticas significativas en las variedades de frijol, garbanzo con valores de 10.78% y las vainas de mezquite con 6.3%; 2) las harinas de garbanzo tuvieron 33956 HU/g, las variedades de frijol 19422 HU/g, y las vainas de mezquite mostraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de lectinas, con medias de 30166 HU/g en vainas moradas a 40766 HU/g en vainas amarillas; con respecto a los fenoles totales, las variedades de frijol fueron estadísticamente diferentes con valores de 10.22 a 12.21 EAG/100g de harina; en garbanzo las medias van de 5.34 a 5.65 EAG/100 g de harina y las vainas de mezquite con medias de 2.9 a 3.8 EAG/100 g de harina; por lo tanto, estas legumbres se pueden consumir sin ningún riesgo en el proceso digestivo, cuando sus contenidos de lectinas y fenoles son bajos, o dando un proceso previo de remojo, cocción o tostado; 3) las harinas de las legumbres analizadas proporcionan pautas para la producción de alimentos con altos contenidos de nutrientes para el consumo humano, los cuales pueden aportar gran valor nutritivo; 4) en la actualidad, para que un alimento sea saludable, se deben tener en cuenta los nutrientes que contiene y los beneficios que aporta a la salud, lo que representa una oportunidad para investigar y caracterizar nuevas materias primas que cumplan con estos requerimientos. La caracterización sienta el punto de partida para comenzar a evaluar técnicas de procesamiento de los alimentos que permitan disminuir los factores antinutricionales y fomentar alimentos no solo nutritivos, sino también seguros.

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

Investigación financiada por el Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) para el Tipo Superior, en el Fortalecimiento de Cuerpos Académicos Convocatoria 2017. Cuerpo Académico “Ciencia y Tecnología Sustentable” UPPE-CA-3, de la Universidad Politécnica de Pénjamo. Con el proyecto titulado: Análisis funcional y nutricional de frijol y otras leguminosas de bajo consumo de agua como materia prima para nuevos productos de valor agregado. Vigencia del apoyo: 14 de agosto de 2017 – 13 de agosto de 2018.



- Bora, P. (2014). Anti-nutritional factors in foods and their effects. *Journal of Academia and Industrial Research*, 3(6), 285-290. <https://www.jairjp.com/NOVEMBER%202014/09%20PARUL%20REVIEW.pdf>
- Chibbar-Ravindra N., P. Ambigaipalan & R. Hoover. (2010). Molecular diversity in pulse seed starch and complex carbohydrates and its role in human nutrition and health. *Cereal Chemistry*, 87(4), 342-352. <http://dx.doi.org/10.1094/CCHEM-87-4-0342>
- Codex Alimentarius. (1989). *Codex Standard 171-1989. NORMA DEL CODEX PARA DETERMINADAS LEGUMBRES*. Recuperado el 28 de septiembre de 2025. https://www.fao.org/input/download/standards/56/CXS_171s.pdf
- David-Laura S., Nalle, C.L., Abdollahi, M.R., & Ravindran, V. (2024). Feeding Value of Lupins, Field Peas, Faba Beans and Chickpeas for Poultry: An Overview. *Animals*, 14(4), 619. <https://doi.org/10.3390/ani14040619>.
- Espinosa-Plascencia, A., & Huerta-Ocampo, J. Á. (2024). Aprovechamiento agroecológico y alimentario del mezquite: una revisión. *Tecnologías Emergentes para la Industria Alimentaria*, 1(2-A), 36-40.
- Felker-Peter, Takeoka, G., & Dao, L. (2013). Pod mesocarp flour of north and south american species of leguminous tree *Prosopis* (Mesquite): Composition and food applications. *Food Reviews International*, 29(1), 49-66. <https://doi.org/10.1080/87559129.2012.692139>
- Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., González Laredo, R. F. & García-Casas M. A. (2013). Efecto del procesamiento térmico sobre la capacidad antioxidante de pinole a base de vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*). *CyTA - Journal of Food*, 11(2), 162-170. <https://doi.org/10.1080/19476337.2012.712057>
- Gimeno, C. E. (2004). Compuestos fenólicos. Un análisis de sus beneficios para la salud. *Offarm: farmacia y sociedad*, 23(6), 80-84.
- García-Santoyo V., Mendiola-Olaya E., Blanco-Labra A., & García-Gasca T. (2009). *Afinidad de fracciones concentradas de lectinas de frijol tepari (Phaseolus acutifolius) por eritrocitos humanos*. 2018, de UAQ Sitio web: http://www.uaq.mx/investigacion/difusion/veranos/memorias-2009/11VCRC_46/10_Garcia_SantoyoV.pdf
- Han H., & Baik, B.K. (2008). Antioxidant activity and phenolic content of lentils (*Lens culinaris*), chickpeas (*Cicer arietinum* L.), peas (*Pisum sativum* L.) and soybeans (*Glycine max*), and their quantitative changes during processing. *International Journal Food Science Technology*, 43(11), 1971-1978. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01800.x>
- Herrera-Flores T. S., Delgado-Herrera A., Ramírez-Patricia., Licea de Anda, E.M., Moreno-Contreras M.G., & Machuca, P.C. (2014). Estudio de la composición



- proximal de variedades de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) Costa 2004 y Blanoro. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. México, 2(2), 9-15. <https://www.researchgate.net/publication/277659210>
- Jacobs, D.R., & Gallaher, D.D. (2004). Whole grain Intake and cardiovascular disease: A review. *Current Atherosclerosis Reports*, 6, 415-23. <https://doi.org/10.1007/s11883-004-0081-y>
- Joshi, M., Adhikari, B., Aldred, P., Panozzo, J., & Kasapis, S. (2011). Physicochemical and functional properties of lentil protein isolates prepared by different drying methods. *Food Chemistry*, 129(4), 1513-1522. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.131>
- Lozada-Salcedo, Euclides Efraín, Núñez-Torres, Oscar Patricio, Rosero-Peñaherrera, Marco Antonio, & Aragadvay-Yungan, Ramon Gonzalo. (2017). Efectos fisiopatológicos de los compuestos secundarios en la alimentación de monogástricos. *Journal of the Selva Andina Animal Science*, 4(1), 82-92. Recuperado en 17 de enero de 2026, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2311-25812017000100007&lng=es&tlng=es.
- Ma, Y., & Wang, T. (2010). Deactivation of soybean agglutinin by enzymatic and other physical treatments. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(21), 11413–11419. <https://doi.org/10.1021/jf1017466>
- Mancera-Castro, P., González-Cruz, L., & Bernardino-Nicanor, A. (2023). Actividad biológica de las proteínas de leguminosas del género Vigna: Una breve revisión. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 26. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.598>
- Maphosa, Y., & Jideani, V. A. (2017). The Role of Legumes in Human Nutrition. En M. Chavarria (ed.), *Functional Food - Improve Health through Adequate Food* (pp.). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.69127>
- Marathe, S. A., Rajalakshmi, V., Jamdar, S. N., & Sharma, A. (2011). Comparative study on antioxidant activity of different varieties of commonly consumed legumes in India. *Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association*, 49(9), 2005–2012. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.04.039>
- Misgana B., & Wabi B. (2020). Review on Nutritional Importance and Anti-nutritional Factors of Legumes. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 9(6), 138-149. <https://doi.org/10.11648/j.ijnfs.20200906.11>
- Monroy-Godínez L. A., Monreal-Martínez D., Valdez-Paz R., & Oviedo-Ramírez T.G. (2014). El mezquite (*Prosopis laevigata*) alternativa económica para el valle del mezquital. 2do. *Congreso Estudiantil de Investigación del Sistema In-*



- corporado UNAM. Sitio web: <http://vinculacion.dgire.unam.mx/Congreso-Trabajos-pagina/PDF/Congreso%20Estudiantil%202014/Proyectos%202014-%20%C3%81rea/3.%20Ciencias%20Sociales/geografia/5.2%20CIN2014A30021-%20Geograf%C3%ADa%20Humana.pdf>
- Moreno-Contreras, M. G., Herrera-Flores, T. S., Licea De Anda, E. M., Arratia-Castro, A. A., & Medina-Haro, A. (2021). Diversidad morfológica del mezquite (*Prosopis* spp.) en la región de Pénjamo, Guanajuato, México. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 9(23). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2021.23.77863>
- Peñarrieta, J. M., Tejeda, L., Mollinedo, P., Vila, J. L., & Bravo, J. A. (2014). Compuestos fenólicos y su presencia en alimentos. *Revista Boliviana de Química*, 31(2), 68-81. http://www.scielo.org.bo/pdf/rbq/v31n2/v31n2_a06.pdf
- Pineda-Lozano, J. E., López-Espinoza, A., Virgen-Carrillo, C. A., Martínez-Moreno, A. G., & Valdés-Miramontes, E. H. (2021). Compuestos fenólicos y su efecto en las dislipidemias en seres humanos: Una revisión sistemática. *Revista chilena de nutrición*, 48(2), 276-285. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182021000200276>
- Rochín-Medina, J. J., Mora-Rochín, S., Navarro-Cortez, R.O., Tovar-Jiménez, X., Quiñones-Reyes, G., Ayala-Luján, J. L., & Aguayo-Rojas, J. (2021). Contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de variedades de frijol sembradas en el estado de Zacatecas. *Acta Universitaria*, 31, e3059. DOI: <http://doi.org/10.15174.au.2021.3059>
- Sauvion, N., Nardon, C., Febvay, G., Gatehouse, A. M., & Rahbé, Y. (2004). Binding of the insecticidal lectin Concanavalin A in pea aphid, *Acyrtosiphon pisum* (Harris) and induced effects on the structure of midgut epithelial cells. *Journal of insect physiology*, 50(12), 1137–1150. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2004.10.006>
- Shreyas, E. M. & Devindra, S.(2022). A review of the nutritional and antinutritional constituents of chickpea (*Cicer arietinum*) and its health benefits. *Crop & Pasture Science*, 73(4), 401-414 <https://doi.org/10.1071/CP21030>
- Singleton-Vernon L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventos, R.M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178. https://www.researchgate.net/profile/Abdelkader-Bouaziz/post/I_would_be_highly_thankful_if_anyone_can_share_the_original_protocol_of_Total_Phenol_Determination_based_on_the_method_of_Singleton_et_al_1999/attachment/5f5173fb6a5a0300017c8e63/AS%3A931815883800577%401599173627106/download/singleton1999.pdf



- Thakur, A., Sharma, V., AayusheeT. (2019). An overview of anti-nutritional factors in food. *International Journal of Chemical Studies*, 7(1), 2472-9. <https://www.academia.edu/download/88224885/7--1-201-135.pdf>
- Vaz-Patto, M.C., Amarowicz, R., Aryee-A.N.A., Boye, J.I., Chung, H. J., Martín-Cabrejas, M.A., & Domoney, C. (2015). Achievements and challenges in improving the nutritional quality of food legumes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34, 105–143. DOI: 10.1080/07352689.2014.897907.
- Vioque, J., Alaiz, M., & Girón-Calle, J.. (2012). Nutritional and Functional properties of Vicia faba protein isolates and related fractions. *Food Chemistry*, 132(1), 67–72, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.033>.
- Yating, M., & Tong, W. (2010). Deactivation of Soybean Agglutinin by Enzymatic and Other Physical Treatments. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(21), 11413–11419. DOI:10.1021/jf1017466
- Zhang, J., Shi, J., Ilic, S., Jun Xue, S. & Kakuda, Y. (2008). Biological properties and characterization of lectin from red kidney bean (*Phaseolus vulgaris*). *Food Reviews International*, 25(1),12-27. <https://doi.org/10.1080/87559120802458115>



Las frutas y hortalizas que deberían correr por las venas mexicanas

The fruits and vegetables that should be in the Mexican bloodstream

Alicia Paulina Cárdenas-Castro¹, Sonia G. Sáyo-Ayerdi², Jorge Alberto Sánchez-Burgos², Nuria Elizabeth Rocha-Guzmán^{1*}

¹ Laboratorio Nacional CONAHCYT de Apoyo a la Evaluación de Productos Bióticos (LaNAEPBi), Unidad de Servicio, Tecnológico Nacional de México/ I.T. Durango (TecNM/ITD), Blvd. Felipe Pescador 1830 Ote., C.P.34080, Durango, Dgo., México.

² Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tepic, Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, División de Estudios de Posgrado, Av. Tecnológico No. 2595, Col. Lagos del Country CP 63175, Tepic, Nayarit, México.

*Autor de correspondencia: nrocha@itdurango.edu.mx

Resumen

Palabras clave:

alimentos endémicos, compuestos bioactivos, saberes ancestrales, prospección, salud.

El abandono de patrones dietéticos tradicionales, prehispánicos o ancestrales se ha relacionado con la realidad de que la población mexicana enfrenta un aumento en el porcentaje de habitantes que 1) desarrollan enfermedades metabólicas (como diabetes) y 2) padecen inseguridad alimentaria. Por ello, es sustancial el rescate de saberes y sabores ancestrales y el acceso universal al conocimiento de lo que el gremio científico alrededor del mundo ha reportado en torno a alimentos endémicos mexicanos sobre cómo impacta su consumo en la salud, así como su valorización en el desarrollo de dietas sostenibles. En este trabajo se realizó una prospección de 10 frutas y hortalizas endémicas de nuestro país: guayaba, nopal, nanchi, chile, tuna, chayote, pitaya, aguacate, papaya y guanábana. Los hallazgos más relevantes son destacados y presentados en la búsqueda del aumento en su consumo y la presentación de alternativas para que puedan ser aprovechados en casa aplicando economía circular.

Abstract

Keywords:

staple food, bioactive compounds, ancestral knowledge, prospecting, health.

Leaving behind the traditional, pre-Hispanic, or ancestral dietary patterns has been linked to the increase in the percentage of the Mexican population that 1) develop metabolic diseases (such as diabetes or obesity) and 2) suffer from food insecurity. Therefore, it is essential to rescue ancestral knowledge and to promote universal access to scientific studies around Mexican endemic foods, including how their consumption impacts health, as well as their valorization for the development of sustainable diets. In this study, a prospecting of 10 endemic fruits and vegetables was conducted: guava, nopal, nanchi, hot pepper, tuna, chayote, pitaya, avocado, papaya, and soursop. The most relevant findings are presented with the aim of increasing their consumption. Besides, by-products that can be consumed at home through the circular economy are also highlighted.

Recibido: 10 de octubre 2025
Revisado: 05 de diciembre 2025
Aceptado: 08 de enero 2026
Publicado: 23 de febrero 2026



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

Los escenarios proyectados para las futuras generaciones respecto a la disponibilidad y el acceso a alimentos son poco esperanzadores y de mucha incongruencia. De acuerdo con los reportes, del 2022 al 2024 se registró una inseguridad alimentaria de moderada a grave en nuestro país del 19.3%. Es decir, 25.1 millones de mexicanos no pudieron comer ya que su acceso a alimentos fue nulo o limitado (FAO, 2025). Por otro lado, la prevalencia de sobrepeso en escolares (5-11 años de edad) fue de 19.2% y la obesidad de 18.1%, mientras que en adolescentes (12-19 años de edad) la prevalencia de sobrepeso fue de 23.9% y de obesidad de 17.2% (ENSANUT, 2025). Esta prevalencia puede desencadenar el desarrollo de diversas enfermedades como hipertensión, diabetes o cáncer (Kussmann, Abe Cunha, & Berciano, 2023). Sin embargo, el conocimiento histórico-gastronómico de nuestro país representa una medida que puede cambiar el rumbo de esos escenarios, incluso protegiendo de diversas enfermedades, siempre y cuando vuelvan a correr por nuestras venas los alimentos pertenecientes a patrones dietéticos ancestrales que se consideran saludables y sostenibles.

Ahora bien, un alimento puede contener nutrientes que necesitamos consumir para vivir y poder realizar nuestras actividades diarias, pero además de ello puede contener compuestos que nos pueden prevenir de diversas enfermedades. Esos compuestos se llaman compuestos bioactivos (CB) y en este trabajo nos enfocaremos en dos subgrupos: fitonutrientes (compuestos fenólicos, carotenoides, alcaloides y compuestos organosulfurados) y reguladores de microbiota colónica (prebióticos, probióticos, simbióticos y postbióticos), principalmente la fibra dietética que tiene efecto prebiótico. Pero, ¿qué son los fitonutrientes y reguladores de la microbiota?

Valdría la pena empezar describiendo a la microbiota. La microbiota se refiere a los microorganismos que viven en nuestro cuerpo (piel, cabello, órganos, etc.) y la microbiota colónica se refiere a los que habitan exclusivamente en el colon humano (intestino grueso). Esos microorganismos son, en su mayoría, bacterias que tienen un impacto positivo y vital en nuestro cuerpo, tanto que hoy en día el colon humano ha sido denominado como el segundo cerebro humano (Hou et al., 2022). La microbiota colónica se alimenta de lo que nosotros consumimos, pero tiene alimentos favoritos, y esos son los fitonutrientes y la fibra dietética. Los fitonutrientes son compuestos producidos por las plantas de frutos y hortalizas que los protegen de diversas amenazas (microorganismos “malos”, sol, daño mecánico, etc.); la fibra dietética es un tipo de carbohidrato que no podemos digerir en nuestro estómago ni en nuestro intestino delgado y por lo tanto llegará al colon, donde se encontrará con este ecosistema de microorganismos (Kussmann et al., 2023). ¿Habías escuchado



que la fibra dietética nos puede ayudar a “ir al baño”? Pues va mucho más allá de solo poder realizar una necesidad fisiológica. Si llegan fitonutrientes y fibra dietética al colon, la microbiota colónica los transformará en compuestos que pueden prevenirnos de diversas enfermedades como diabetes, cáncer y hasta enfermedades neurológicas (Chen et al., 2025).

¿Qué alimentos contienen tanto fitonutrientes como fibra dietética? La respuesta está en las frutas y hortalizas, por lo que el objetivo de este trabajo fue realizar una prospección de 10 frutas y hortalizas endémicas de nuestro país: guayaba (*Psidium guajava* L.), nopal (*Opuntia ficus-indica*), nanchi (*Byrsonima crassifolia*), chile (*Capsicum annuum*), tuna (*Opuntia ficus-indica*), chayote (*Sechium edule*), pitaya (*Stenocereus queretaroensis*), aguacate (*Persea americana*), papaya (*Carica papaya*) y guanábana (*Annona muricata*). Para ello se realizó una revisión bibliográfica de los estudios referentes a los beneficios a la salud (potencial funcional) así como de los mecanismos o las vías por las cuales estos alimentos ejercen un beneficio a la salud (eje intestino-cerebro). Además, es necesario resaltar que son alimentos en los que nada podría desperdiciarse si se aprovechan saberes ancestrales que conllevan a la valorización de subproductos (cáscaras y semillas).

Entre los colores de las frutas y las hortalizas: nada debe desperdiciarse

México posee alimentos que hoy en día son considerados regalos que le ha otorgado al mundo (Cárdenas-Castro et al., 2019). La cocina mexicana se caracteriza por ser diversa en olores, colores y sabores. Los colores de las frutas y hortalizas son explicados por la presencia de ciertos compuestos bioactivos, los cuales son los denominados compuestos fenólicos y carotenoides, y son propiamente descritos como metabolitos secundarios producidos por las plantas que cuando son consumidos por los seres humanos podrían ejercer beneficios a la salud, principalmente previniendo el desarrollo de diversos padecimientos (Kusmann et al., 2023). Dentro de las 10 frutas y hortalizas endémicas y/o que son consumidas casi en su totalidad (incluyendo cáscara y semilla) en nuestro país se encuentran: la guayaba (*Psidium guajava* L.), el nopal (*Opuntia ficus-indica*), el nanchi (*Byrsonima crassifolia*), el chile (*Capsicum annuum*), la tuna (*Opuntia ficus-indica*), el chayote (*Sechium edule*), la pitaya (*Stenocereus queretaroensis*), el aguacate (*Persea americana*), la papaya (*Carica papaya*) y la guanábana (*Annona muricata*). Cada una de estas frutas y hortalizas tiene un dato interesante por el cual deberían correr por las venas mexicanas (Figura 1).

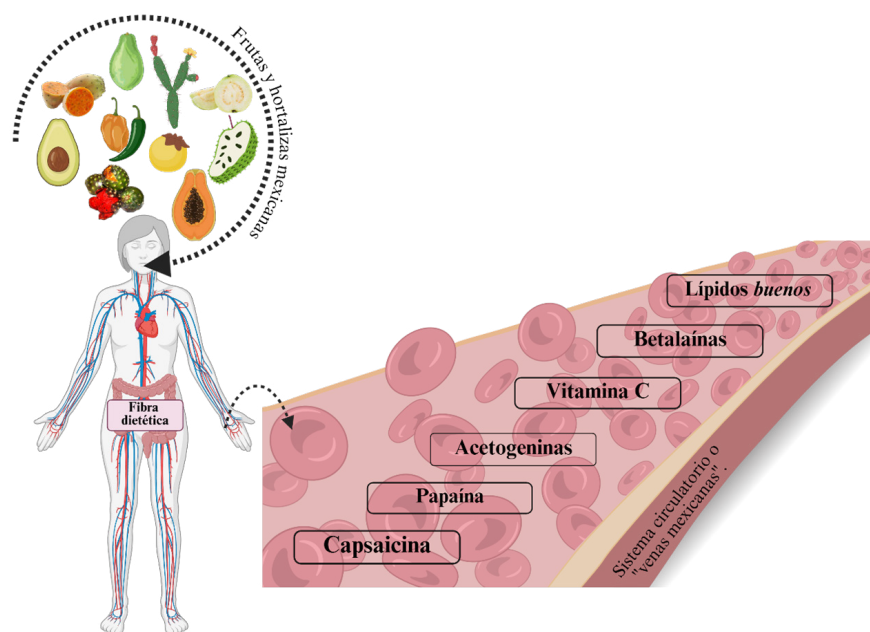


Figura 1. Frutas y hortalizas endémicas con los compuestos más representativos que poseen
Fuente: Elaboración propia en software Biorender®

La guayaba contiene hasta tres veces más vitamina C que las naranjas (Zou & Liu, 2023), además de contener al menos 75 meroterpenoides propios de la guayaba que son compuestos que podrían ejercer efectos de prevención contra el cáncer, efectos antiinflamatorios y cuidado al hígado (hepatoprotectivos) (Zou & Liu, 2023). Se ha estudiado el efecto que puede tener su consumo en el cuidado de los niveles de glucosa, el cual puede prevenir el desarrollo de diabetes (Zou & Liu, 2023). El aguacate es un fruto nativo de México y muy querido alrededor del mundo, ya que se estima que la producción de aguacate alcance 35.55 miles de millones de dólares en 2029 (García-Gurrola et al., 2024). Es considerado uno de los frutos más saludables por su contenido único de lípidos (ácidos grasos monoinsaturados) y compuestos bioactivos [carotenoides y tocoferoles (constituyentes de la vitamina E)] (Cárdenas-Castro et al., 2023). Particularmente, el ácido oleico, el cual es el ácido graso monoinsaturado más abundante en el aguacate, ha sido asociado con la prevención de cáncer de seno, diabetes y enfermedades cardiovasculares debido al equilibrio que ejercen en el aumento de “grasas buenas” (Cárdenas-Castro et al., 2023). Por otro lado, México es el máximo exportador de papaya, uno de los frutos tropicales más importantes del mundo (FAO, 2024). La papaya contiene vitaminas y minerales como el magnesio y el potasio; destaca su contenido de enzimas como papaína, la cual ayuda y mejora la digestión (específicamente de proteínas) gastrointestinal, por lo que su principal efecto en la salud es el cuidado de nuestro sistema digestivo (Babalola et al., 2024; Qaiser, Ali, & Manzoor, 2024).



En el caso del chile, uno de los alimentos endémicos más relacionados con México alrededor del mundo, nos regala una gama de colores rojo, amarillo, verde y anaranjado. México se ha considerado el centro de domesticación y cultivo de *Capsicum annuum* (una de las 5 especies de chile más cultivadas en el mundo) (Alonso-Villegas et al., 2023). El chile se considera una fuente importante de fibra, vitaminas y minerales. Si algo ha vuelto tan famoso alrededor del mundo al chile y por lo cual ha sido mayormente investigado, es por el contenido de una sustancia que la planta produjo para protegerse de “cosas malas” como microorganismos que la pudieran enfermar y esa sustancia se llama capsaicina (la cual, pertenece a un grupo de compuestos específicos que contiene el chile que se llama capsaicinoides), culpable de que cuando consumamos el chile nos cause aumento de temperatura, sudor y enrojecimiento, pero vale la pena porque los beneficios a la salud que puede proporcionarnos pueden ser muy grandes, tales como la prevención en el desarrollo de osteoporosis (Chen et al., 2025b). Las culturas prehispánicas encontraron hace más de 600 años que esa sustancia que le otorga un sabor único al chile puede protegernos de diversas enfermedades o como alivio del dolor (dolores de cabeza, tensión muscular) (Alonso-Villegas et al., 2023).

Siguiendo la línea de producción mundial, México es el líder productor de guanábana (Deniz-González et al., 2025). Es una de las frutas que posee más estudios contra el desarrollo de cáncer. Las acetogeninas son los compuestos bioactivos que contiene la guanábana que podrían estar ejerciendo protección contra la formación de diversos tipos de cáncer en los humanos (Mathpal et al., 2025). Es importante señalar que la annonacina es la acetogenina más abundante en las hojas del árbol de guanábana y se ha demostrado que tiene la propiedad de inhibir el suministro de energía a células de cáncer, ocasionando la muerte de las células “malas” (Chan et al., 2024). Más adelante se menciona la importancia del consumo de las hojas de guanábana en infusiones.

Por otro lado, el chayote, la tuna y el nopal hacen honor a un dicho que podríamos modificar de la siguiente manera (ya que los tres son verdes): “los mexicanos en cualquier lado somos verdes”. Son tres alimentos que representan una opción poderosa para enfrentar la inseguridad alimentaria de nuestro país, así como cuidar y proteger nuestra salud. El chayote es considerado un cultivo noble porque no requiere mucho mantenimiento o cuidado cuando es sembrado. Recientemente fue reportado que su consumo presentó diversas mejoras en pacientes mayores con Síndrome Metabólico (exceso de grasas y azúcares y presión alta) (Arista-Ugalde et al., 2022); estudios se han enfocado en el análisis de la fibra dietética que presenta (Doria, Mejía, & Cifuentes, 2025), además, la fibra del chayote tuvo un impacto po-



sitivo en la microbiota colónica ya que aumentó el crecimiento de bacterias buenas que produjeron compuestos benéficos (ácido acético) (Guo et al., 2025).

El nopal pertenece a la familia Cactaceae, del género *Opuntia*, con más de 150 especies clasificadas como originarias/endémicas de México y que cumplen una función ecológica vital ya que mejoran o previenen el empobrecimiento del suelo (Hernández-Becerra et al., 2022). Desde la época prehispánica, los nopales han sido utilizados como alimento y medicina. Se podría dedicar todo un artículo o más para exponer los beneficios a la salud que tiene el nopal; sin embargo, resalta que es un alimento bajo en calorías (27 kcal/100 g), en general, su contenido de minerales es tal que puede enfrentar la deficiencia de minerales en poblaciones; es una fuente importante de calcio (sobre todo representa una alternativa para el consumo de calcio a los que no pueden consumir leche y sus derivados) y se ha concluido que el nopal puede prevenir diabetes, obesidad, hipertensión e hipercolesterolemia (Hernández-Becerra et al., 2022). Uno de los frutos del nopal, la tuna, contiene fibra dietética (particularmente pectina), la cual resulta benéfica para la microbiota colónica. Además, es muy interesante que la tuna la consumimos con todo y semilla, las cuales contienen ácidos grasos poliinsaturados, esenciales para el cuidado del corazón y el buen funcionamiento del cerebro; además estos ácidos grasos son cruciales en la absorción de las vitaminas A, D, E y K, lo que hace que la tuna sea aún más especial en términos nutritivos (Mkhize & Cele, 2025). Otro fruto del nopal es la pitaya, la cual pertenece a una de las 21 especies del género *Stenocereus*, endémicas de México. La pitaya, en sus colores rojo y morado principalmente, contiene compuestos bioactivos que se llaman betalaínas, las cuales han presentado evidencia de reducir hasta en un 65% células dañadas, lo cual le podría proporcionar propiedades antitumorales (Martínez-Rodríguez et al., 2025). Vale la pena destacar que la tuna roja (*Opuntia joconostle*) también contiene betalaínas y se utiliza en la elaboración de colonche, una bebida fermentada prehispánica que también puede tener enormes beneficios a la salud, sobre todo para la microbiota colónica (Lappe-Oliveras et al., 2025). En general, el nopal y sus frutos pueden contribuir activamente a la seguridad alimentaria y sustentabilidad ya que su integración a sistemas agroforestales puede promover la reforestación al estabilizar el suelo, mejorar la retención de agua y crear hábitats para la vida silvestre (Mkhize & Cele, 2025). Otro artículo podría dedicarse solo a las bebidas fermentadas en México, y ese conocimiento también debe rescatarse debido a que tenemos a disposición muchos frutos con subproductos (semillas y cáscaras de frutas) que podrían utilizarse y aprovecharse para la elaboración de bebidas fermentadas hechas en casa (Figura 2). En ese sentido, el nanchi, un fruto circular y pequeño (1.5-2 cm), se encuentra inexplorado en nuestro país



debido a que su producción se concentra en algunos estados solamente (Michoacán, Guerrero, Nayarit, Veracruz y Yucatán) (López-Guzmán et al., 2023; SIAP, 2024), pero su cosecha podría y debería aumentar ya que es un fruto que contiene fibra dietética, vitamina C, ácidos grasos insaturados y compuestos bioactivos (Martins et al., 2025), los cuales, han demostrado que pueden tener efectos antiinflamatorios (Miki et al., 2024). Además, la semilla representa un 25-34% del peso del fruto, por lo que estudios científicos podrían enfocarse en su investigación (Martins et al., 2025).

Cuando nos referimos a que nada debe desperdiciarse, en verdad nada debe desperdiciarse porque hasta las hojas de los árboles de los frutos tienen ciencia reportada (Figura 2). El ejemplo rey de esto es el nopal, puesto que nos comemos hasta sus frutos (tuna y pitaya), y de estos, incluidas las semillas. Por lo tanto, el nopal es un regalo completo del campo y, de acuerdo con muchos estudios que se han realizado en torno al nopal, debería estar presente todos los días en al menos una comida del día (Duarte-Medina et al., 2024).



Figura 2. Ejemplos de la valorización de subproductos de frutas y hortalizas
Fuente: Elaboración propia en software Biorender ®

Las hojas del árbol de guayaba, chayote, guanábana y aguacate son sumamente prometedoras para el área de la salud, ya que recientemente se ha reportado sus efectos antiinflamatorios y de protección contra daño celular (que podría iniciar un



cáncer) (Chan et al., 2024; Park et al., 2019; Sahal et al., 2025; Wahyuningtyas et al., 2022), así que se estudia muy cuidadosamente su uso en infusiones o té.

La ciencia lo comprueba y la microbiota colónica lo prueba: siempre en nuestro colon

Generalmente, los estudios científicos que se realizan alrededor de frutos y hortalizas se hacen de manera individual, analizando semilla, pulpa, cáscara, hojas o hasta el tallo. Sin embargo, las bondades que ofrecen las frutas y hortalizas se atribuyen a que son alimentos que por tradición o cultura se consumen completos o casi completos, como en el caso de la guayaba, el chile, el nopal, el chayote y la pitaya.

¿Cuál es el vínculo entre la microbiota colónica, los compuestos bioactivos y la fibra dietética para el cuidado de nuestra salud? En la Figura 3 se muestra el mecanismo general de comunicación entre la microbiota colónica y su impacto en nuestra salud.

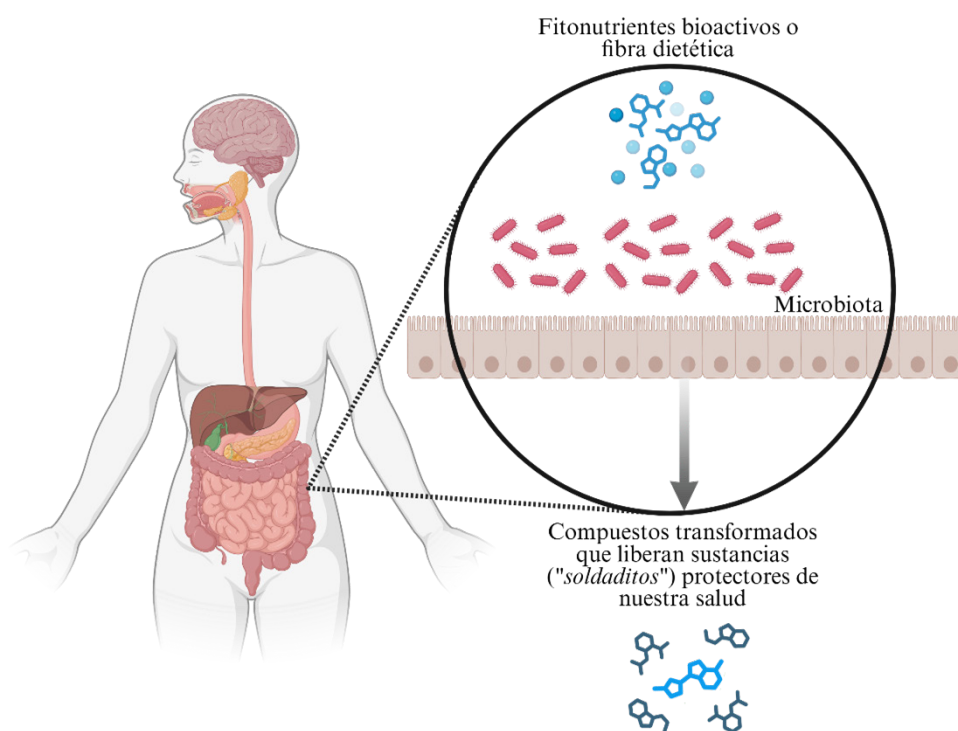


Figura 3. Mecanismo general del vínculo entre la microbiota y los compuestos bioactivos y la fibra dietética
Fuente: Elaboración propia en software Biorender ®

La microbiota colónica recibe lo que no se digiere en el estómago y en el intestino delgado. Es importante distinguir que en el intestino delgado se pueden absorber los compuestos bioactivos y llegar al torrente sanguíneo para protegernos de enfermedades (Figura 1). Aun así, si consumimos las frutas y hortalizas mencionadas,



seguramente una parte de los compuestos bioactivos y fibra dietética (esa es segura) llegarán a ser devorados por la microbiota. La microbiota se “comerá” esos compuestos y la fibra, y los transformará en otros compuestos que provocarán la liberación de “soldaditos” protectores (citoquinas antiinflamatorias) de nuestra salud, por ejemplo, sustancias que evitan que estemos inflamados o que directamente podrían ejercer un efecto directo en un órgano (por ejemplo, la capsaicina la transforman a nonivamida, la cual protege al hígado) (Cárdenas-Castro et al., 2024). Además, ¡la microbiota colónica evita que bacterias malas o virus se instalen en nuestro colon y provoquen una infección!, siempre y cuando esa microbiota esté conformada por un escuadrón de bacterias buenas (como los *Lactobacillus*) (Singh et al., 2025).

Para finalizar, también se ha estudiado que si “alimentamos” a la microbiota colónica con alimentos saludables, tales como las frutas y hortalizas mexicanas, nos pueden proteger de enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer, y también mejora nuestro estado de ánimo (Zhou et al., 2024). - ¿Será por eso que nos pone tan felices comer comida mexicana? Hasta los extranjeros terminan enamorados de nuestros alimentos, y también estudiando sus bondades.

Conclusiones

El campo mexicano contiene un tesoro del saber ancestral que hemos dejado de lado puesto que científicamente se ha comprobado el beneficio a la salud que puede tener el consumo de las 10 frutas y hortalizas expuestas en el artículo (y faltan muchas más por explorar). En general, los compuestos bioactivos que contienen estos alimentos, así como la fibra dietética, pueden prevenir el desarrollo de diversas enfermedades como cardiovasculares o diabetes. El estudio particular y profundo de cada uno de estos alimentos ha permitido conocer qué compuestos específicos son los encargados de ejercer beneficios a la salud (por ejemplo, las acetogeninas de la guanábana, la capsaicina del chile o el ácido oleico del aguacate) y cómo es que lo hacen. En ese sentido, antes se creía que el intestino grueso era solo un reservorio de desechos; hoy podemos entender el impacto que tiene en nuestra salud el cuidado de la microbiota colónica. Finalmente, no solo el consumo de la pulpa de las frutas u hortalizas pueden proporcionarnos beneficios, también pueden hacerlo el consumo de las hojas de los árboles (y que incluso podrían tener más compuestos bioactivos que los encontrados en la pulpa) así como el aprovechamiento (o consumo) de cáscaras y semillas de los mismos.

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

- Alonso-Villegas, R., González-Amaro, R. M., Figueroa-Hernández, C. Y., & Rodríguez-Buenfil, I. M. (2023). The genus capsicum: a review of bioactive properties of its polyphenolic and capsaicinoid composition. *Molecules*, 28(10), 4239. <https://doi.org/10.3390/molecules28104239>
- Arista-Ugalde, T. L., Santiago-Osorio, E., Monroy-García, A., Rosado-Pérez, J., Aguiñiga-Sánchez, I., Cadena-Iñiguez, J., Gavia-García, G. & Mendoza-Núñez, V. M. (2022). Antioxidant and anti-inflammatory effect of the consumption of powdered concentrate of *Sechium edule* var. *nigrum spinosum* in Mexican older adults with metabolic syndrome. *Antioxidants*, 11(6), 1076. <https://doi.org/10.3390/antiox11061076>
- Babalola, B. A., Akinwande, A. I., Otunba, A. A., Adebami, G. E., Babalola, O., & Nwifo, C. (2024). Therapeutic benefits of *Carica papaya*: A review on its pharmacological activities and characterization of papain. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(1), 105369. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105369>
- Cárdenas-Castro, A. P., del Carmen Perales-Vázquez, G., Laura, A., Zamora-Gasga, V. M., Ruiz-Valdiviezo, V. M., Alvarez-Parrilla, E., & Sáyago-Ayerdi, S. G. (2019). Sauces: An undiscovered healthy complement in Mexican cuisine. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 17, 100154. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100154>
- Cárdenas-Castro, A. P., Fernández-Ochoa, Á., Cádiz-Gurrea, M. d. l. L., Segura Carretero, A., & Sáyago-Ayerdi, S. G. (2023). Bioactive phytochemicals from avocado oil processing by-products. En M. F. Ramadan Hassanien (ed.), *Bioactive phytochemicals from vegetable oil and oilseed processing by-products* (pp. 403-430). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91381-6_18
- Cárdenas-Castro, A. P., Sost, M. M., Gutiérrez-Sarmiento, W., Ruíz-Valdiviezo, V. M., Mateos-Briz, R., Sáyago-Ayerdi, S. G., & Venema, K. (2024). Analyzing the gut microbiota and microbial-associated metabolites of tomato-based sauces. *Food Chemistry*, 460, 140664. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140664>
- Chan, W.-J. J., Beale, P., McLachlan, A. J., Hanrahan, J. R., & Harnett, J. E. (2024). The safety and tolerability of *Annona muricata* leaf product in people living with cancer: study protocol. *Advances in Integrative Medicine*, 11(3), 143-148. <https://doi.org/10.1016/j.aimed.2024.06.004>
- Chen, Y., Lei, Z., Gu, D., Zhao, H., Yu, R., He, Q., . . . Du, H. (2025). Gut microbiota: A potential enhancing factor for the therapeutic efficacy of bioactive compounds in herbal medicines. *Fitoterapia*, 183, 106570. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2025.106570>



- Chen, Y., Peng, Q., Lan, D., Yao, C., Chen, X., Wang, Y., & Qi, S. (2025)b. Capsaicin-activated autophagy protects BMSC function under oxidative stress: mechanisms and therapeutic implications. *Journal of Molecular Endocrinology*, 75(3), e250063. <https://doi.org/10.1530/JME-25-0063>
- Deniz-González, P. d. J., Grageola-Núñez, F., Bautista-Rosales, P. U., Sánchez-Escalante, A., Ávila-Villarreal, G. M., Estévez, M., & Rodríguez-Carpena, J. G. (2025). Antioxidant activity and acute oral toxicity of soursop (*Annona muricata* L.) leaf and its effect on the oxidative stability of Mexican hairless pork patties. *Foods*, 14(18), 3212. <https://doi.org/10.3390/foods14183212>
- Doria, C. M. M., Mejía, F. F. O., & Cifuentes, A. L. D. (2025). Characterization of the dietary fiber obtained from chayote *Sechium edule* (Jacq.) Sw. var. *virens levis*. *Food Chemistry Advances*, 8, 101091. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101091>
- Duarte-Medina, D. J., Martínez-Flores, H. E., Tranquilino-Rodríguez, E., & Secundino, J. P. (2024). Hypolipidemic-hepatoprotective effect of a cookie added with *Opuntia atropes cladodes* and *Opuntia joconostle* fruits in a rat model. *Future Foods*, 9, 100306. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100306>
- García-Gurrola, A., Martínez, A. L., Wall-Medrano, A., Olivas-Aguirre, F. J., Ochoa-Ruiz, E., & Escobar-Puentes, A. A. (2024). Phytochemistry, anti-cancer, and anti-diabetic properties of plant-based foods from Mexican agrobiodiversity: A review. *Foods*, 13(24), 4176. <https://doi.org/10.3390/foods13244176>
- Guo, Q., Wang, X., Yang, C., Yu, J., Cui, Q., Hou, X., ... & Zhang, Z. (2025). Assessment of in vitro digestion properties and prebiotic potential of chayote (*Sechium edule*) pectin. *Food Bioscience*, 69, 106781. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106781>
- Hernández-Becerra, E., de los Ángeles Aguilera-Barreiro, M., Contreras-Padilla, M., Pérez-Torrero, E., & Rodríguez-García, M. E. (2022). Nopal cladodes (*Opuntia Ficus Indica*): Nutritional properties and functional potential. *Journal of Functional Foods*, 95, 105183. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105183>
- Hou, K., Wu, Z.-X., Chen, X.-Y., Wang, J.-Q., Zhang, D., Xiao, C., ... Li, J. (2022). Microbiota in health and diseases. *Signal transduction and targeted therapy*, 7(1), 135. <https://doi.org/10.1038/s41392-022-00974-4>
- Kussmann, 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>
- Lappe-Oliveras, P., Fernández, R. A., Valadez-Blanco, R., Martínez-Monterrosa, Á., Linares, C. I. O., Casildo, R. M. T., ... Giles-Gómez, M. (2025). Mexican



- traditional alcoholic beverages: Production process, history, economy, social, and scientific importance. En J. Prakash Tamang (ed.), *Microbiology and Health Benefits of Traditional Alcoholic Beverages* (pp. 145-240). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13322-0.00005-8>
- López-Guzmán, G. G., Balois-Morales, R., Bautista-Rosales, P. U., & Jiménez-Zurita, J. O. (2023). Morphological and molecular characterization of nanche (*Byrsonima crassifolia* L.) native of Nayarit, Mexico. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 10(3). <https://doi.org/10.19136/era.a10n3.3714>
- Martínez-Rodríguez, P., Malo-García, M., Hernández-García, S., Youssefi, S., Nateri, A. S., Guerrero-Rubio, M. A., & Gandia-Herrero, F. (2025). Betalain-containing foods and their antitumoral potential: A comprehensive review of in vitro and in vivo evidence. *Trends in food science & technology*, 163, 105150. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105150>
- Martins, T. A., Tovar, B. C. A., Pereira, J., de Sá, F. P., & de Oliveira, T. F. (2025). Removal of amoxicillin, phenol, and diethyl phthalate using activated carbon from murici seeds (*Byrsonima crassifolia* L. Kunth). *Desalination and Water Treatment*, 322, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101134>
- Mathpal, S., Priyamvada, P., Ashok, G., Joshi, T., Saha, D., Mukherjee, A., . . . Anbarasu, A. (2025). Network pharmacology-driven investigation of luteolin from *Annona muricata* as a promising multi-target inhibitor for pancreatic cancer. *Results in Chemistry*, 16, 102506. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102506>
- Miki, K. S. L., Dresch, A. P., Cavali, M., da Silva, A. P., Marafon, F., Fogolari, O., ... & Bender, J. P. (2024). Influence of drying methods in the ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from *Byrsonima crassifolia* to evaluate their potential antitumor activity. *Food and Humanity*, 2, 100242. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100242>
- Mkhize, X., & Cele, T. (2025). A comparative analysis using a forest resource *Opuntia ficus-indica* L. (prickly pear) and *Pyrus communis* (common pear) a commercial fruit: Implications on nutrition and food systems sustainability. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101892. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101892>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *Major Tropical Fruits Market Review. Preliminary Results 2023*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/c03844d3-3dc6-4465-abf3-8c49947e77d8/content>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.). *Datos de Seguridad Alimentaria*. Consultado el 05 de octubre de 2025. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/FS>



- Park, S., Nam, Y. H., Rodriguez, I., Park, J. H., Kwak, H. J., Oh, Y., . . . Lee, J. S. (2019). Chemical constituents of leaves of *Persea americana* (avocado) and their protective effects against neomycin-induced hair cell damage. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 29(6), 739-743. <https://doi.org/10.1016/j.bjp.2019.08.004>
- Qaiser, A., Ali, S., & Manzoor, S. (2024). Prospects of *Carica papaya* in the treatment of human viral infections: A comprehensive and a systematic review. *Heliyon*, 10(21), e39635. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39635>
- Sahal, A., Chaudhary, S., Hussain, A., Arora, S., Dobhal, A., Ahmad, W., . . . Kumar, S. (2025). A comprehensive review on the nutritional composition, bioactive potential, encapsulation techniques, and food system applications of guava (*Psidium guajava* L.) leaves. *Grain & Oil Science and Technology*, 8(1), 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2024.12.003>
- Secretaria de Salud, Instituto Nacional de Salud Pública y Centro de Investigación en Evaluación y Encuestas. (s.f.). *Encuesta Nacional de Salud y Nutrición*. Consultado el 05 de octubre de 2025. https://ensanut.insp.mx/encuestas/ensanutcontinua2022/documentos_analiticos.php
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Acciones y Programas. (2024). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Singh, A., Kaur, P., Kumar, M., Shafi, S., Upadhyay, P. K., Tiwari, A., . . . Kumari, S. (2025). The role of phytochemicals in modulating the gut microbiota: Implications for health and disease. *Medicine in Microecology*, 24, 100125. <https://doi.org/10.1016/j.medmic.2025.100125>
- Wahyuningtyas, A. P., Putri, D. P., Maharani, N., & Al-Baarri, A. N. m. (2022). Flavonoid fraction from chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw) leaves reduced malondialdehyde (MDA) and tumor necrosis factor- α (TNF- α) in hyperuricemic rats. *Nutrition & Food Science*, 52(2), 366-378. <https://doi.org/10.1108/NFS-04-2021-0134>
- Zhou, X.-P., Sun, L.-B., Liu, W.-H., Zhu, W.-M., Li, L.-C., Song, X.-Y., . . . Gao, S.-H. (2024). The complex relationship between gut microbiota and Alzheimer's disease: a systematic review. *Ageing Research Reviews*, 104, 102637. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2024.102637>
- Zou, X., & Liu, H. (2023). A review of meroterpenoids and of their bioactivity from guava (*Psidium guajava* L.). *Journal of Future Foods*, 3(2), 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.12.005>



Relevancia estructural y funcional de las globulinas 11S de fuentes vegetales: un enfoque para la alimentación sostenible

Structural and functional relevance of 11S globulins from plant sources: an approach to sustainable food

Jesús Eduardo Pizano-Galvez¹, Juan Alberto Osuna-Castro², Judith Esmeralda Urías-Silvas^{1*}

¹ Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Camino Arenero 1227, El Bajío, C.P. 45019, Zapopan, Jalisco, México.

² Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima, Autopista Colima-Manzanillo km 40, 28100 Tecomán, Colima, México.

*Autor de correspondencia: jurias@ciatej.mx

Palabras clave:

proteínas vegetales, tecnofuncionalidad, nutrición, industria alimentaria, proteínas de almacenamiento.

Keywords:

plant proteins, technofunctionality, nutrition, food industry, storage proteins.

Resumen

Las globulinas 11S son proteínas de almacenamiento o reserva con amplia distribución en una gran variedad de semillas y granos. La estructura cuaternaria, conformada por protómeros α - β , cuya subunidad ácida y subunidad básica están unidas por puentes disulfuro, explica muchas de las propiedades fisicoquímicas y tecnofuncionales, así como el condicionamiento de su comportamiento nutricional y el potencial para la generación de péptidos bioactivos. Esta revisión condensa el conocimiento disponible respecto al origen y diversidad de las globulinas 11S, así como los aspectos estructurales y su relación con la naturaleza fisicoquímica y funcional de dicha clase de proteínas y los métodos analíticos y computacionales para su estudio. Además de aplicaciones industriales y retos actuales en el panorama de investigación y el desarrollo alimentario.

Abstract

11S globulins are storage proteins widely distributed in a wide variety of seeds and grains. Their quaternary structure, consisting of α - β protomers, where their acidic and basic subunits are linked by disulfide bonds, explains many of their physicochemical and technofunctional properties, as well as their nutritional behavior and the potential for generating bioactive peptides. This review summarizes the available knowledge regarding the origin and diversity of 11S globulins, as well as their structural aspects and relationship with the physicochemical and functional properties of 11S globulins, and the analytical and computational methods used for their study. It also discusses industrial applications and current challenges in food research and development.

Recibido: 24 de octubre 2025

Revisado: 16 de diciembre 2025

Aceptado: 30 de diciembre 2025

Publicado: 23 de febrero 2026



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

Las proteínas de almacenamiento de semillas representan un reservorio de nutrientes fundamental para la germinación y crecimiento de la plántula y a su vez una fuente proteica de gran interés para la industria alimentaria y la nutrición humana. La biosíntesis de estas proteínas en la maduración del grano, su plegamiento en el retículo endoplasmático (RE) y posterior almacenamiento en cuerpos proteínicos, así como la respuesta al estrés, son factores que condicionan la calidad y cantidad de las fracciones: albúminas, prolaminas y globulinas: 7S y 11S (Vitale & Pedrazzini, 2022). Comprendidas en el conjunto de las proteínas de almacenamiento y siendo uno de los grupos más representativos, las globulinas 11S, también conocidas como leguminas, se distinguen por poseer una conformación cuaternaria relativamente conservada, atributo que explica su estabilidad fisicoquímica y determina su comportamiento tecnofuncional. Si bien, las primeras estructuras tridimensionales reportadas fueron resueltas mediante cristalografía de rayos X y sentaron las bases del modelo hexamérico característico, actualmente se han complementado las técnicas experimentales con modelados computacionales asistidos con inteligencia artificial para el estudio tanto de la conformación estática como la plasticidad molecular y estados de ensamble u oligoméricos (Jumper et al., 2021; Tamara et al., 2022). En perspectiva de la ciencia alimentaria, las leguminas son atractivas debido a su tecnofuncionalidad que permite el diseño de matrices alimentarias atractivas y con gran calidad nutricional. Sin embargo, aún se presentan retos y limitaciones como la solubilidad limitada en determinadas condiciones y el potencial alergénico en ciertos sectores de la población (Guo et al., 2024; Pi et al., 2021). Estos desafíos dan lugar a esfuerzos por optimizar procesos de extracción y modificación para obtener proteínas con mejor funcionalidad y seguridad, con escalabilidad y viabilidad económica, así como con reducción del impacto ambiental.

Esta revisión comprende los aspectos más relevantes respecto a la biosíntesis, caracterización estructural, tecnofuncionalidad, nutrición y aplicaciones alimentarias de las globulinas 11S a escala industrial. El objetivo de este trabajo es presentar un marco crítico que facilite la comprensión respecto al panorama estructural y funcional de las globulinas 11S.

Importancia de las globulinas 11S

Las globulinas 11S conforman una de las familias proteínicas más importantes pertenecientes a las proteínas de reserva en semillas, principalmente en leguminosas, pseudocereales y cereales como arroz y avena, y cumplen un papel crítico tanto en el desarrollo inicial de la plántula como en el valor nutricional y tecnológico en la pro-



ducción de alimentos. Este tipo de proteínas se sintetizan de manera masiva durante la maduración del grano en el endospermo o los cotiledones, según la naturaleza de la especie, y son almacenados en cuerpos proteicos y vacuolas hasta el proceso de germinación para ser utilizadas como fuente de aminoácidos, nitrógeno, carbono y azufre para el embrión en crecimiento (Ren et al., 2022; Yang et al., 2023). En un enfoque fisiológico, la acumulación de globulinas 11S en la semilla induce al sistema biosintético de la célula, en gran medida al RE, a la gestión de grandes flujos de proteína. Mismos que son capaces de activar respuestas de estrés proteostático, como la respuesta a proteínas desplegadas, que pautan la capacidad del RE para el plegamiento y procesamiento de proteínas de reserva. Alteraciones en este proceso pueden derivar en variaciones estructurales de las globulinas 11S como agregación, proporción de protómeros o subunidades y en algunas glicoleguminas, diferencias en grado y perfil de glicosilación; aspectos que pueden comprometer la funcionalidad de dicho tipo de proteínas de la semilla como ingrediente alimentario (Vitale & Pedrazzini, 2022).

Actualmente, en búsqueda de fuentes proteínicas alternativas, los canales de investigación se han centrado en cultivos vegetales y subproductos con alto contenido de globulinas 11S debido a su abundancia y sus propiedades tecnofuncionales de gran utilidad para la industria alimentaria (Tabla 1).

Tabla 1. Contenido de globulinas en semillas de interés alimentario

Semilla	Proteína Total (% peso seco)	Globulinas (% de la proteína total)	Globulinas Estimadas* (% peso seco)	Referencia
Garbanzo	25-29	53-60	13.3-17.4	Begum et al. (2023)
Frijol	27	49-80	13.2-21.6	Begum et al. (2023)
Chícharo	20-25	55-65	11-16.3	Wu et al. (2023)
Lenteja	20-30	44-70	8.8-21	Salaria et al. (2022)
Haba	27.6	69-78	19-21.5	Martineau-Côté et al. (2022)
Amaranto	17.8	16-35	2.9-6.2	Bojórquez-Velázquez et al. (2021)
Chía	18-25	52-64	9.8-14.7	San Pablo-Osorio et al. (2019)
Soya	40	40-50	16-20	Singh et al. (2015)

Nota. *El contenido de globulinas fue estimado a partir del porcentaje de globulinas respecto a la proteína total, considerando el contenido promedio de proteína reportado para cada semilla. Los valores pueden variar de acuerdo a la variedad, origen geográfico y condiciones de cultivo.

La elección de una fuente proteica vegetal idónea depende de factores como la fracción relativa de globulinas 11S en el proteoma de la semilla, la composición amino-



cídica de la misma y factores como el rendimiento agronómico, facilidad de extracción y el costo de producción. Hoy en día la soya es la fuente insignia relativa a la obtención de proteínas vegetales, destacando su contenido en glicinina (su globulina 11S), no solo en el panorama alimentario, sino también en el ámbito de la investigación donde al día de hoy sigue siendo un modelo referente en el entendimiento de la estructura y función de leguminas y vicilinas, como también son llamadas las globulinas 7S (Sim et al., 2021). Sin embargo, en los últimos años, cultivos como la chía han tomado gran importancia como potencial fuente de proteínas de alto valor biológico debido a su alto contenido proteico (18 a 25% en peso seco) del cual las globulinas 11S conforman la fracción mayoritaria, posicionando a este pseudocereal como una materia prima interesante para la industria de alimentos. No obstante, la investigación respecto a la purificación y caracterización de la globulina 11S de esta fuente vegetal sigue siendo limitada (Wang et al., 2024). Otra fuente de proteínas vegetales significativa es la semilla de amaranto, misma que tiene un contenido de proteína aproximado al 18% en peso seco. Actualmente las globulinas 11S de amaranto conocida como amarantina han sido foco de investigación respecto a su purificación, logrando purezas de hasta el 95% y caracterización estructural y tecnofuncional en las que destacan el modelado de su estructura tridimensional, capacidad de ensamble, solubilidad y capacidad emulsificante (Aguilar-Padilla et al., 2023). Asimismo, también se ha remarcado el uso de leguminosas como el chícharo, haba y frijol como fuentes alternativas de proteína vegetal en las que las globulinas, principalmente las leguminas, en el caso de las dos primeras, y en frijol la globulina 7S o faseolina, predominan en la fracción proteica, de acuerdo a la especie y variedad (Bianju et al., 2020; Srenuja et al., 2023; Xiao et al., 2025). A pesar de los avances científicos sobre el tema, aún existen brechas significativas como la falta de estudios comparativos entre especies, protocolos de extracción que minimicen la pérdida de la funcionalidad de las proteínas y la presencia de sabores indeseados en los productos finales. El abordaje de estos temas permitiría, en gran medida, tanto la generación de conocimiento para aumentar el entendimiento de la naturaleza estructural de las globulinas 11S y comportamiento en sistemas complejos para su aplicación en la formulación de nuevos productos o como sustituyente para análogos de proteínas animales.

Estructura de globulinas 11S

Las leguminas son sintetizadas como precursores polipeptídicos con un péptido señal N-terminal para el ingreso al RE. De este proceso resulta la conformación de una secuencia procesada en dos cadenas denominadas cadena ácida o cadena α (32 a 40 kDa) y cadena básica o cadena β (18 a 25 kDa). En el proceso de plegamiento



co/postraduccional en el RE se establecen puentes disulfuro tanto intramoleculares como inter-subunidad; este mecanismo desemboca en la formación de protómeros heterodiméricos α - β también conocidos como proglobulinas 11S. El ensamble de tres protómeros conforma un trímero que, en vacuolas, ocurre el procesamiento proteolítico en el sitio conservado Asn-Gly por acción de la asparagil endopeptidasa o legumaina y que, por asociación cara a cara con dos trímeros rotos, genera el hexámero nativo de las globulinas 11S. Esta conformación cuaternaria es responsable de la estabilidad de la molécula y de su comportamiento frente a variaciones de factores externos (Chen et al., 2020). La interfase de estabilización hexamérica a partir de la asociación de dos trímeros es dominada por regiones hidrofóbicas y contactos polares complementarios; usualmente, un puente disulfuro intercatenar se ubica en la región de contacto entre trímeros y contribuye fuertemente a la estabilidad del hexámero conformado. La superficie de contacto entre los trímeros comprende una región considerable del área superficial de la proteína; con ello se reduce la accesibilidad a sitios proteolíticos y se logra mayor estabilidad estructural frente a variaciones de temperatura. Asimismo, se han identificado residuos aromáticos y leucinas en estas regiones hidrofóbicas que actúan como anclas de la interfaz (Chamizo-González et al., 2022). La importancia de los puentes disulfuro en las globulinas 11S no solo se sustenta en el mantenimiento de los protómeros α - β , sino que también tienen la capacidad de estabilizar la asociación de los oligómeros; condiciones reductoras propician la ruptura de estos enlaces, conduciendo a la pérdida de la organización hexamérica y aumentando la accesibilidad proteolítica (Pengyu et al., 2021).

El estudio estructural de las globulinas 11S comprende una amplia lista de técnicas complementarias que cubren escalas espaciales y temporales distintas. Desde el estudio de la estructura secundaria local hasta la conformación cuaternaria completa, la dinámica conformacional e interacciones con ligandos. Iniciando con técnicas clásicas como la electroforesis en geles de poliacrilamida nativos (PAGE) en sus diferentes modalidades, cromatografía de exclusión molecular, ultracentrifugación analítica y dispersión dinámica de luz, las cuales son herramientas que permiten analizar la pureza y composición protomérica y ensamble de las globulinas 11S, mientras que técnicas como el dicróismo circular (DC), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) proporcionan información respecto a la composición de estructuras secundarias y la estabilidad térmica de la molécula. Aumentando la resolución de las técnicas, la cristalografía de rayos X ha sido el pilar central para la descripción de estructuras de globulinas 11S a escala atómica; sin embargo, su dependencia de la obtención de cristales limita su aplicación, que la criomicroscopía electrónica (cryo-EM) no comparte y por ello se ha posicionado como una técnica



poderosa para la descripción de la conformación hexamérica y trimérica en condiciones próximas al estado nativo mediante la captura de poblaciones conformacionales heterogéneas (Rasheed et al., 2020; Van Drie & Tong, 2020). Estas herramientas son complementadas con procedimientos como la dispersión de rayos X a bajo ángulo, espectroscopía de masas en condiciones nativas y movilidad iónica (nMS/IMS) que permiten mediciones de masas y geometrías de complejos nativos, identificación de ligandos no covalentes y el seguimiento de transiciones hexámero-trímero con alta sensibilidad (Karch et al., 2022; Tamara et al., 2022). Hoy en día esta amplia batería de técnicas experimentales se integra con aproximaciones bioinformáticas avanzadas, iniciando con la predicción estructural mediante inteligencia artificial con herramientas emergentes como AlphaFold2 y RoseTTaFold hasta simulaciones de dinámica molecular, docking y modelado integrativo permitiendo relacionar la estabilidad interfacial, la respuesta a estímulos externos y la interacción con otras moléculas (Jeyaraj et al., 2025; Stofella et al., 2024). En conjunto, la convergencia de técnicas experimentales y computacionales ha permitido la obtención de modelos robustos y dinámicos de las globulinas 11S, describiendo no solo su conformación hexamérica y trimérica en el caso de las expresadas en *Escherichia coli*, sino también su plasticidad conformacional y mecanismos de disociación y ensamble que resultan de gran importancia para la comprensión de su funcionalidad biológica y alimentaria, y su potencial aplicación tecnológica y biotecnológica.

Relación estructura-función de las globulinas 11S: propiedades funcionales y características tecnológicas

El estudio de la relación entre la estructura y la funcionalidad de las globulinas 11S es de suma importancia, ya que cambios mínimos en la secuencia, la modificación y conformación postraduccional o durante el procesamiento industrial se pueden traducir en cambios de las propiedades tecnofuncionales de las mismas, que a su vez determinan la calidad de una fuente de proteína de alta calidad para aplicaciones en la industria de alimentos.

La solubilidad de las globulinas 11S es una característica multifactorial, regida por la carga neta de las moléculas, en la que intervienen directamente el punto isoelectrico (pI), la distribución de residuos hidrofóbicos e hidrofílicos en la superficie de la proteína, la presencia de enlaces disulfuro y la conformación oligomérica de la proteína. En términos prácticos, las globulinas 11S presentan mínima solubilidad en ambientes con pH cercano al pI de la globulina específica, y la solubilidad aumenta a pH alejados del pI, donde la repulsión electrostática es mayor y se favorece la disociación de agregados proteicos (Gul et al., 2023). Asimismo, la fuerza iónica tiene



una doble influencia sobre la solubilidad de la proteína: un rango bajo de fuerza iónica en el medio causa el fenómeno “salting-in” que aumenta la solubilidad al estabilizar las cargas, mientras que a alta fuerza iónica provoca el efecto “salting-out” produciendo la precipitación proteica por competencia de los iones con interacciones proteína-agua (Johansson et al., 2023; Kang et al., 2021).

Básicamente, cinco regiones variables (nombradas de I a V) y cuatro conservadas han sido identificadas a través del alineamiento de las estructuras primarias de las globulinas 11S de semillas. Desde el punto de vista estructural, en las proglobulinas 11S las regiones variables I, III, y V se encuentran orientadas hacia la cara IA (que contiene el puente disulfuro intracadena) y las regiones II y IV hacia la cara IE (que contiene el puente disulfuro intercadena) (Figura 1A). Las regiones I, III y V quedan en la superficie del trímero, mientras que las regiones II y IV sólo parcialmente. Las globulinas 11S maduras se ensamblan como hexámeros a través de su cara IE después del procesamiento proteolítico en el sitio Asn-Gly en la región variable IV (Carrasco-Peña et al., 2013; Tandang-Silvas et al., 2010). La cara IA permanece en la superficie del hexámero y consecuentemente las regiones I, III y V; mientras que algunas partes de las regiones II y IV se colocan en los costados de cada trímero. Por lo tanto, las regiones I, III y V y las partes expuestas de las regiones II y IV podrían contribuir al comportamiento superficial de la molécula (Figura 1B). Cambios en el pH (ejemplo de 7 a 2) pueden alterar la conformación de la proteína exponiendo u ocultando sitios de unión al agua. En el caso de las globulinas 11S nativas, el hexámero puede disociarse en sus dos trómeros constituyentes resultando probablemente en un cambio del comportamiento superficial. Por lo que regiones hidrofóbicas que interactúan en la formación del hexámero a través de la cara IE de cada trímero constituyente son expuestas incrementando la hidrofobicidad superficial. Adicionalmente, aquellas regiones que emergen después del procesamiento proteolítico en el sitio Asn-Gly podrían contribuir al cambio en las propiedades superficiales de la proteína. Esto podría explicar por qué la globulina 11S nativa de amaranto es menos soluble que la proglobulina recombinante. Interesantemente, la adición de las cuatro metioninas continuas en la región variable V de la proglobulina de amaranto modificada (situadas en el exterior de la molécula) por ingeniería de proteínas, incrementó la hidrofobicidad superficial dando como resultado una menor solubilidad que la proglobulina de amaranto heteróloga sin modificar (Carrasco-Peña et al., 2013).

Además, factores como las interacciones proteína-ligando afectan la solubilidad. La unión con polisacáridos puede formar complejos con globulinas 11S que incrementan la viscosidad, reduciendo la solubilidad, mientras que la interacción



con polifenoles propicia la formación de agregados insolubles que afectan negativamente la extracción y modifican la funcionalidad proteica (Chen & Luo, 2024). En la práctica industrial y de investigación, el pretratamiento de la materia prima antes de la extracción proteínica con frecuencia mejora el rendimiento y la calidad de los aislados de proteína; no obstante, el uso de condiciones agresivas en los pretratamientos puede provocar modificaciones negativas y disminuir tanto la solubilidad como la funcionalidad de la proteína (Santos et al., 2024; Senna et al., 2024).

Las proteínas son hidrocoloides que pueden funcionar como emulsionantes y estabilizadores de emulsiones de aceite en agua (o/w). La capacidad emulsificante de las globulinas 11S es dependiente de factores correlacionados como lo son la capacidad de difusión y adsorción en la interfase y la capacidad de formación de películas interfaciales cohesivas y elásticas. Se ha encontrado que la buena actividad emulsificante de las leguminas depende del balance entre su hidrofobicidad e hidrofiliidad superficial que les permite establecer más interacciones entre la interfase de la emulsión, comportándose como un surfactante adecuado. Las condiciones de pH ácido también podrían causar un desdoblamiento parcial de los trímeros de las globulinas 11S (Carrasco-Peña et al., 2013; Withana-Gamage et al., 2020). Esto, a su vez, permitiría exponer regiones hidrofóbicas, aumentando el área interfacial entre la interfaz agua-aceite (Figura 1C). Sin embargo, una mayor actividad emulsificante inicial no garantiza la estabilidad de la misma ya que la red interfacial formada por subunidades desnaturalizadas tiende a ser frágil y sufrir coalescencia (Hasegawa et al., 2023). Modificaciones durante los procesos industriales como la glicosilación controlada o la conjugación enzimática han mostrado mejoría en la estabilidad de las emulsiones al aumentar la solubilidad y movilidad superficial sin un proceso de desnaturalización agresiva (Gul et al., 2023).

Otra característica de las globulinas relacionada al fenómeno de adsorción es su capacidad para formar espumas. El comportamiento espumante de las globulinas 11S es la capacidad de las mismas para adsorberse de manera rápida en la interfase aire-agua y formar redes cohesivas que resisten la coalescencia y el drenaje (Zhang et al., 2024). Respecto a este fenómeno, en globulinas 11S existe correlación entre el alto contenido de enlaces disulfuro y una menor estabilidad de la espuma; este comportamiento se interpreta por el aumento en la rigidez molecular que proporcionan los enlaces disulfuro a la proteína en solución, mecanismo que disminuye la capacidad reorganizativa y elástica en la interfase aire-agua (Cermeno et al., 2024).

La capacidad gelificante térmica y no térmica de las globulinas 11S es otro de los atributos más explorados en la industria alimentaria como análogos de textura. La gelificación de proteínas globulares inducida por calor es el resultado de tres



pasos: la desnaturalización térmica de la proteína, la formación de agregados solubles y sus interacciones para formar una red que atrapa agua y otros componentes. La desestabilización de las estructuras cuaternaria y terciaria de las globulinas 11S por tratamiento térmico podría modificar el comportamiento superficial de dichas proteínas. Altos niveles de hidrofobicidad y fuerzas atractivas electrostáticas y la formación de puentes disulfuro pueden promover la gelificación inducida por calor que, en conjunto, conforman una red tridimensional (Carrasco-Peña et al., 2013; Tandang-Silvas et al., 2010; Yaputri et al., 2024). Características como rigidez, porosidad y sinéresis del gel formado dependen de la concentración de proteína, el pH de gelificación, la fuerza iónica del sistema y la presencia de Ca_2^+ . A mayor proporción de globulinas 11S se favorece la firmeza del gel y resistencia al corte; no obstante, la presencia de globulinas 7S también modula la textura y atribuye al gel mayor elasticidad y menor fragilidad. Es por ello que el equilibrio de globulinas 11S-7S es un parámetro importante durante el proceso de desarrollo de productos. Además, tratamientos físicos no térmicos y enzimáticos permiten controlar, hasta cierto punto, la microestructura del gel (Gravel et al., 2024).

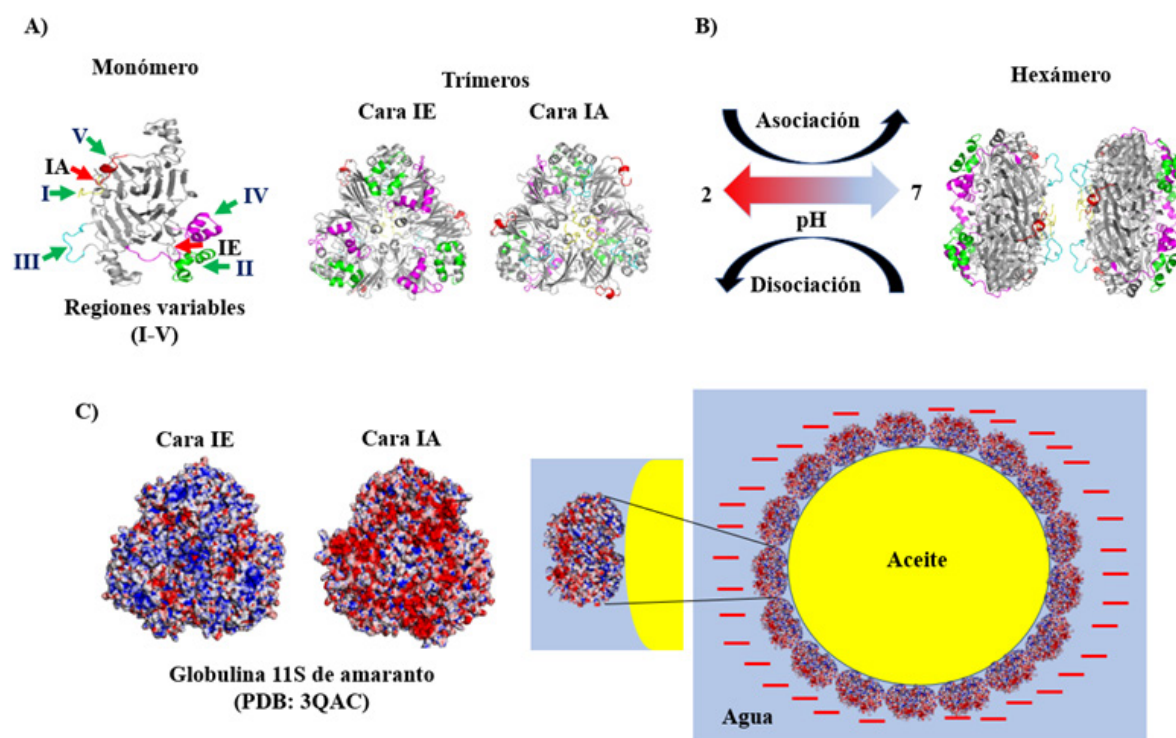


Figura 1. Estructura tridimensional de la proglobulina 11S con regiones variables (I-V) y conservadas (A), ensamble de la globulina 11S en función del pH (B) y capacidad emulsificante (C). Adaptada y modificada de: Carrasco-Peña et al., 2013; Tandang-Silvas et al., 2013; Withana-Gamage et al., 2020



Nutrición y bioactividad

Las leguminas representan una importante fracción de las proteínas de almacenamiento en leguminosas y cereales por lo que constituyen un componente significativo en el aporte proteico de alimentos vegetales ricos en proteína, como la soya, donde las globulinas 11S representan aproximadamente el 52% de la proteína total (Kohli & Singha, 2024). La calidad nutricional de una proteína depende considerablemente de su perfil de aminoácidos esenciales y las 11S se caracterizan por presentar perfiles aminoacídicos relativamente equilibrados, aunque con variaciones destacables entre especies. En general, este grupo de proteínas contiene proporciones considerables de arginina, leucina e isoleucina, como en el caso de la chía, y en el caso de cultivos como el amaranto y cáñamo presentan cantidades destacables de aminoácidos azufrados como la metionina y cisteína (Tabla 2) (Ajibola & Aluko, 2022; Santos et al., 2024; Vidal Torres et al., 2024). Durante el procesamiento tecnológico factores como el pH y las sales de extracción, así como procesos térmicos y enzimáticos ejercen efectos ambivalentes sobre la biodisponibilidad y accesibilidad de las leguminas, evidenciando la digestibilidad y liberación de péptidos bioactivos. No obstante, tratamientos agresivos favorecen la agregación y modificaciones conformacionales que reducen la digestibilidad y biodisponibilidad (Rivera del Rio et al., 2022; Wang et al., 2024). En este sentido, la estructura hexamérica compacta y el alto contenido de hojas β que caracteriza a las globulinas 11S, se ha relacionado con resistencia a la digestión *in vitro*. Tal es el caso de los fragmentos de globulinas 11S de frijol común que han reportado ser resistentes a pepsina y quimotripsina. (Contardo et al., 2025; Santamaria et al., 2024). En este sentido, se ha reportado el porcentaje de digestibilidad *in vitro* de algunas fuentes vegetales como el chícharo que presenta una digestibilidad baja en la fase gástrica (34.2%) con un aumento considerable en la fase intestinal (83.7%). Asimismo, globulinas 11S de cáñamo presentan porcentajes de digestibilidad *in vitro* considerablemente elevados (72.7%). Así las globulinas 11S pueden ser una fuente de proteína de buena calidad (Ajibola & Aluko, 2022; Contardo et al., 2025). Más allá de sus características nutricionales, en las globulinas 11S también se han reportado como buena fuente para la generación de péptidos bioactivos. Procesos como la hidrólisis de concentrados de globulinas 11S pueden liberar fragmentos peptídicos menores a 1 kDa con actividades bioactivas como actividad antioxidante, antidiabetes o anticáncer *in vitro* y el uso de herramientas *in silico* para la validación, predicción y selección de péptidos específicos con mayor probabilidad para presentar actividad biológica (Tabla 3) (Briceño-Islas et al., 2024; Khalid et al., 2023; San Pablo-Osorio et al., 2019; Villanueva et al., 2024). En conjunto, la evidencia científica reciente apunta a que las fuentes vegetales de globulinas



11S representan matrices con alto potencial para la industria alimentaria y nutracéutica. Sin embargo, retos como el condicionamiento tanto de su tecnofuncionalidad como actividad biológica pautados por aspectos estructurales requieren de atención para seleccionar y optimizar fracciones con potencial aplicable real y la resolución de retos de estabilidad, seguridad y evaluación clínica.

Tabla 2. Composición de aminoácidos de globulinas 11S de algunas semillas

Aminoácido	Soya (Sun et al., 2021)	Cáñamo (Sun et al., 2021)	Sésamo (Hsiao et al., 2006)	Requerimiento diario sugerido (Ajibola & Aluko, 2022)
Ala	3.87	6.26	6.62	
Cys#	1.55	1.17	1.14	
Asp	4.65	4.69	4.11	
Glu	8.13	8.21	7.53	
Phe*	3.48	3.91	3.65	
Gly	7.94	6.65	7.53	
His*	2.9	1.95	2.51	1.9
Ile*	3.29	4.3	4.34	2.8
Lys*	3.68	2.15	1.83	5.8
Leu*	7.94	7.04	6.62	6.6
Met*#	0.96	0.97	3.2	
Asn	6.39	6.65	4.79	
Pro	7.36	3.52	4.34	
Gln	8.72	7.24	8.68	
Arg	6.39	11.35	9.82	
Ser	8.33	8.21	7.53	
Thr*	4.06	4.3	5.25	3.4
Val*	6.58	7.04	6.85	3.5
Trp*	0.77	0.97	0.91	1.1
Tyr	2.9	3.32	2.74	

Porcentaje de aminoácidos en base seca. * Indica aminoácidos esenciales. # indica aminoácidos sulfurados

**Tabla 3.** Péptidos bioactivos derivados de globulinas 11S identificados mediante herramientas *in silico*

Bioactividad	Secuencia peptídica	Referencias
Antihipertensión	GI, TG, GM, IP, PG, GS, GG, KF, FG, GD, HL, IF	Montoya-Rodríguez et al. (2015)
	GL, TE, EV, AG, GV, RR, IE, PH, HG, AP, IY	Medina-Godoy et al. (2013)
	NF, IR, LP, LFR, GVSEE, ALEP, VNVDDPSK, EG, YL, GKP, VIKP, LVVVPQN, NR	Sánchez-López et al. (2021)
	LPILR, FNLPIRL, SFNLPIL, QAFEDGFEWVSFK, AFEDGFEWVSFK, VNVDDPSK	Nardo et al. (2020)
	FG, FEW, FSG, AHW	Chirinos et al. (2023)
	FLISCLL, SVFDEELS	Vilcacundo et al. (2019)
Antioxidantes	IR, EL, TY, HL, YL, LH, KP, VY, LK, PHG, PEL, RHL, LHV	Montoya-Rodríguez et al. (2015)
	VIKP	Sánchez-López et al. (2021)
	AWEEREQGSR, YLAGKPQQEH, IYIEQNGITGM, TEVWDSNEQ, GDRFQDQHQ, LAGKPQQEHSGEHQ, PLQAEQDDR, HVIKPPSRA, AVNVDDPSK, KFNRPETT	Orsini et al. (2016)
Anticáncer	VVV, GQ	Montoya-Rodríguez et al. (2015)
	QIVNDQGQSVFDEELSR, TSENAMFQSLAGR, QAFEDGFEWVSFK, TSENAMFQSLAGR, EFQQGNECQIDR, LTALEPTNR; ADVYTPEAGR, FNRPETTLFR, VQEGHLVIKPPSR, IQAEAGLTEVWDSNEQEFR, LLAESFGVSEEIAQK, CAGVSVIR, GERNTGNI	Quiroga et al. (2015)
Antidiabetes	FN, FEW, LM, AMP, AHW	Chirinos et al. (2023)
	HA, MA, LL, LP, AP, FA, MP, PA, VA, FP, LA, PP, KA, VV, VP, DFIILE	Montoya-Rodríguez et al. (2015)
	VIKP, LVVVPQ, NR, NF, IR, LP, LFR	Sánchez-López et al. (2021)
	LP, AD, AE, AG, FN, FQ, IR, LM, VE, VM, VS, YQ, LR	Briceño-Islas et al. (2024)

Nomenclatura de aminoácidos: C, Cys: cisteína; H, His: histidina; I, Ile: isoleucina; M, Met: metionina; S, Ser: serina; V, Val: valina; A, Ala: alanina; G, Gly: glicina; L, Leu: leucina; P, Pro: prolina; T, Thr: treonina; F, Phe: fenilalanina; R, Arg: arginina; Y, Tyr: tirosina; W, Trp: triptófano; D, Asp: ácido aspártico; N, Asn: asparagina; E, Glu: ácido glutámico; Q, Gin: glutamina; K, Lys: lisina; Z, Glx: cualquiera de E o Q; B, Asx: cualquiera de D o N.

Aplicación de ciencias ómicas en la caracterización de globulinas 11S

La aplicación de las ciencias ómicas ha ampliado significativamente el estudio y la comprensión de las globulinas 11S mediante la caracterización a nivel molecular, estructural y regulatorio. Entre esos enfoques, la proteómica ha emergido como la herramienta ómica más utilizada para el estudio de proteínas de almacenamiento por su alta capacidad para resolver su heterogeneidad, el procesamiento postraduccional y la diversidad de isoformas. La proteómica basada en espectrometría de masas, entre las que se encuentran, por ejemplo, LC-MS/MS o MALDI-TOF/TOF, se ha



consolidado como una herramienta clave para la identificación y caracterización de subunidades y variantes de las globulinas 11S. La aplicación de estas técnicas permite, además de la identificación de isoformas, inferir modificaciones postraduccionales y perfiles de concentración relativa entre condiciones o accesiones genéticas. En el caso de las semillas de uva, por ejemplo, se logró la identificación de los monómeros de la de globulina 11S, y mediante acoplamiento molecular se predijeron los posibles sitios de interacción del compuesto fenólico malvidina-3-O-glucósido (antocianina de uvas rojas y vinos) a la estructura tridimensional de la legumina, información relevante en el entendimiento del uso de esta clase de proteínas para modular el color del vino (Chamizo-González et al., 2022). De la misma manera, estudios proteómicos comparativos en semillas de amaranto cultivado y silvestre ha revelado isoformas de globulinas 11S con perfiles distintos, sugiriendo una variabilidad funcional y adaptación entre especies y condiciones climatológicas y de cultivo (Bojórquez-Velázquez et al., 2019).

El enfoque transcriptómico, especialmente el uso de RNA-seq, ha permitido el mapeo de la expresión de los genes que codifican a las globulinas 11S durante el desarrollo de las semillas y bajo diversas condiciones ambientales y genéticas. La combinación de transcriptómica y proteómica ofrece una visión más completa de la regulación de la síntesis de globulinas a nivel transcripcional y postranscripcional. Actualmente investigaciones como la de Barberini et al. (2025) han implementado herramientas transcriptómicas y proteómicas conjuntas en el estudio de globulinas 11S de quinoa y encontraron que genes codificantes de globulinas 11S se encuentran entre los más abundantes tanto a nivel de transcrito como de proteína, remarcando su lugar central en la biología de las proteínas de almacenamiento y la determinación de la calidad proteica de la semilla. Además de técnicas directas de estudio ómico, la caracterización de las familias genéticas que codifican a las globulinas 11S abona información crucial acerca de la variabilidad estructural, funcional y evolutiva. La genómica comparativa y filogenética es una herramienta clave para comprender la diversidad molecular de estas proteínas. Los análisis de secuenciación genética han mostrado que los genes que codifican globulinas 11S pertenecen a familias multigenéticas que han experimentado recurrentemente duplicación, divergencia y especialización funcional, especialmente en dicotiledóneas. En contraste con las monocotiledóneas, que han presentado menor representación y diversidad de genes que codifican globulinas 11S, esta diferencia da un indicio de la heterogeneidad cualitativa y cuantitativa en la acumulación de este tipo de proteínas entre ambos grupos taxonómicos. En este sentido, estudios filogenéticos han sugerido que la expansión de familias genéticas de globulinas 11S de dicotiledóneas se relaciona



con presiones evolutivas asociadas a aumentar la eficiencia en el almacenamiento de nitrógeno y carbono durante el desarrollo de la semilla (Li et al., 2012). En conjunto, la integración de las ciencias ómicas establece una estrategia eficaz para el estudio intensivo de la complejidad molecular de las globulinas 11S, permitiendo la correlación de secuencias genéticas, perfiles de expresión y abundancia proteica con atributos funcionales, este enfoque ofrece un marco robusto para aumentar la comprensión de la naturaleza y aplicación de estas proteínas.

Aplicaciones en la industria alimentaria

En el panorama económico actual, el uso de proteínas vegetales, entre las que se encuentran las globulinas 11S, ha dejado de ser una tendencia de nicho para posicionarse como un sector financiero global, alcanzando un mercado valorado en aproximadamente 3.4 mil millones de dólares en el año 2025 con una proyección de crecimiento a los 4.81 mil millones de dólares para 2030 con una tasa de crecimiento anual compuesta del 7.18% (Mordor Intelligence, 2026). En la industria de alimentos, las globulinas 11S son de gran relevancia para la obtención de aislados proteínicos con alta funcionalidad y para el desarrollo de análogos de origen animal. Las estrategias de extracción y purificación determinan, además del rendimiento y pureza proteica, la conservación de la conformación nativa y funcionalidad tecnológica, siendo destacable que técnicas “verdes”, generalmente, preservan mejor la bioactividad y reducen la formación de agregados y complejos indeseables comparado a procesos convencionales (Kim et al., 2024; Tang et al., 2024). Su aprovechamiento en la industria de alimentos se ha ampliado a la generación de análogos de productos animales, como el desarrollo de yogures de soya con mejores propiedades gelificantes y de textura mediante la conjugación de globulinas con glucosa y procesos a altas presiones (Ren et al., 2024). Además, el diseño de nanoacarreadores alimentarios para encapsular compuestos activos, como la betalaína (Martínez et al., 2019). En la aplicación en texturizados de análogos cárnicos, las globulinas 11S destacan por su capacidad de formar redes densas y estables en condiciones de elevada humedad, contribuyendo a la generación de estructuras fibrosas y anisotrópicas con similitud con la carne. Sin embargo, su combinación con otras fracciones proteínicas y carbohidratos ha permitido desarrollar productos con mayor jugosidad y propiedades sensoriales, lo cual está estrechamente relacionado con la capacidad de las globulinas 11S para interactuar con lípidos y compuestos aromáticos, estabilizando su liberación durante la masticación (Ishaq et al., 2022; Sui et al., 2024). Además de su importancia estructural y tecnofuncional, las globulinas 11S inciden directamente en la percepción sensorial de los alimentos en los que se incorporan. Diversos estudios



han demostrado que las globulinas 11S pueden unirse a compuestos volátiles hidrofóbicos y desarrollar notas aromáticas tanto deseables como indeseables (hexanal, pentanal, aldehídos y alcoholes) (Ince et al., 2025). Se ha descrito que este tipo de unión se da en regiones hidrofóbicas situadas en las subunidades ácida y básica de las 11S, donde se dan interacciones hidrofóbicas, de Van der Waals y puentes de hidrógeno que reducen el coeficiente de partición de la fase gaseosa y se volatilizan durante el consumo, con ello se modula la liberación de aromas durante la ingesta y la intensidad sensorial percibida (Xu et al., 2025). En productos como la leche de soya y bebidas proteicas, mayor proporción de globulinas 11S respecto a la fracción 7S ha sido correlacionado de manera positiva con mejoramiento de olor, textura y aceptabilidad general, sugiriendo que la estructura compacta y distribución de regiones hidrofóbicas impacta positivamente en el perfil sensorial (Ma et al., 2015).

En otro sentido, el interés por la diversificación de materias primas más allá de la soya ha impulsado el estudio de cultivos poco explorados como el amaranto, la quinoa y la chía, así como la revalorización de subproductos derivados de procesos industriales ya establecidos. Estas fuentes exhiben propiedades atractivas en cuanto a su contenido de globulinas 11S y la aplicabilidad de las mismas, destacando una mayor proporción de aminoácidos esenciales y atributos tecnofuncionales atractivos para su uso en el sector alimentario (Aguilar-Padilla et al., 2023; Chen & Luo, 2024). La integración de innovaciones respecto a la extracción, diseño de matrices alimentarias y aprovechamiento de materias primas no convencionales posiciona a las leguminas en un punto central de la transición hacia sistemas alimentarios sostenibles, funcionales y diversificados.

Retos y perspectivas futuras

El desarrollo de alimentos a partir de globulinas 11S es un área con gran potencial tecnológico; sin embargo, se enfrenta a retos importantes que condicionan su aprovechamiento. En los procesos de extracción y purificación es clave la elección del proceso ya que de ello depende no solo el rendimiento de extracción, sino también la estabilidad estructural y funcional de estas proteínas, con ello las tecnologías “verdes” son las más prometedoras por tener un menor impacto sobre la integridad proteica y la conservación conformacional (Kim et al., 2024; Tang et al., 2024). No obstante, existen limitantes como la variabilidad agronómica, costos de escalamiento, los problemas con la generación de sabores y/o colores indeseables y principalmente la alergenicidad de algunas leguminas siguen siendo retos a superar (Kerezsi et al., 2022). En el panorama ambiental, se muestra que, aunque las extracciones de proteínas vegetales presentan menor huella de carbono que la obtención de proteínas animales, el gasto



energético del procesamiento puede disminuir esta ventaja, lo que resalta la importancia de la revalorización de subproductos agroalimentarios (Allotey et al., 2023). Con este panorama, se plantean perspectivas futuras como la integración de ciencias ómicas y herramientas computacionales para el diseño de procesos personalizados, obtención dirigida de péptidos bioactivos, aplicación de tecnologías avanzadas para la formulación de análogos cárnicos y el mejoramiento genético para la reducción de agentes alergénicos así como la validación de estudios de biodisponibilidad y ensayos clínicos para la consolidación de las leguminas en la innovación alimentaria sostenible.

Conclusiones

Las globulinas 11S son una de las fracciones proteicas de almacenamiento vegetales de mayor interés por su integridad respecto a propiedades tecnológicas, nutricionales y biofuncionales. Este conjunto de atributos las perfila como ingredientes clave en el desarrollo de alimentos. Sin embargo, su aprovechamiento actualmente presenta retos significativos. En este panorama, la revalorización de subproductos agroalimentarios, la aplicación de ciencias ómicas y bioinformáticas ofrecen oportunidades para enfrentar y solucionar los retos actuales para ampliar su estudio y aplicaciones.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en la publicación de este artículo.

Agradecimientos

Se agradece al fondo de ciencia de frontera, proyecto número CF-2023-I-2694, así como también a la Red CYTED INNOPROT (124RT0164) por el apoyo brindado.

Referencias

- Adachi, M., Takenaka, Y., Gidamis, A. B., Mikami, B., & Utsumi, S. (2001). Crystal structure of soybean proglycinin A1aB1b homotrimer. *Journal of Molecular Biology*, 305(2), 291–305. <https://doi.org/10.1006/jmbi.2000.4310>
- Aguilar-Padilla, J., Centeno-Leija, S., Bojórquez-Velázquez, E., Elizalde-Contreras, J. M., Ruiz-May, E., Serrano-Posada, H., & Osuna-Castro, J. A. (2023). Characterization of the Technofunctional Properties and Three-Dimensional Structure Prediction of 11S Globulins from Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) Seeds. *Foods*, 12(3), 461. <https://doi.org/10.3390/foods12030461>
- Ajibola, C. F., & Aluko, R. E. (2022). Physicochemical and functional properties of 2S, 7S, and 11S enriched hemp seed protein fractions. *Molecules*, 27(3), 1059. <https://doi.org/10.3390/molecules27031059>



- Allotey, D. K., Kwofie, E. M., Adewale, P., Lam, E., & Ngadi, M. (2023). Life cycle sustainability assessment outlook of plant-based protein processing and product formulations. *Sustainable Production and Consumption*, 36, 108–125. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.021>
- Barberini, M. L., Lee, Y. S., Guerrero, L. D., Obertello, M., Mazzella, M. A., Bertero, D., Grotewold, E., & Muschietti, J. P. (2025). Comparative transcriptomic, proteomic, and amino acid content analyses of quinoa (*Chenopodium quinoa*) seed accessions from diverse geographic locations. *BMC Plant Biology*, 25(1), 1002. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06913-z>
- Begum, N., Khan, Q. U., Liu, L. G., Li, W., Liu, D., & Haq, I. U. (2023). Nutritional composition, health benefits and bio-active compounds of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Frontiers in Nutrition*, 10, 1218468. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1218468>
- Bojórquez-Velázquez, E., Barrera-Pacheco, A., Espitia-Rangel, E., Herrera-Estrella, A., & De La Rosa, A. P. B. (2019). Protein analysis reveals differential accumulation of late embryogenesis abundant and storage proteins in seeds of wild and cultivated amaranth species. *BMC Plant Biology*, 19(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1656-7>
- Bojórquez-Velázquez, E., Talamantes-Herrera, F. A., Cerritos-Castro, I. T., Valles, S., & Barba de la Rosa, A. P. (2021). Molecular characterisation of seed storage proteins (SSPs) in grain amaranth. En D. Adhikary, M. K. Deyholos, & J. P. Délano-Frier (eds.), *The Amaranth Genome* (pp. 55–79). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72365-1_5
- Briceño-Islas, G., Mojica, L., & Urías-Silvas, J. E. (2024). Functional chia (*Salvia hispanica* L.) co-product protein hydrolysate: An analysis of biochemical, anti-diabetic, antioxidant potential and physicochemical properties. *Food Chemistry*, 460, 140406. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140406>
- Byanju, B., Rahman, M. M., Hojilla-Evangelista, M. P., & Lamsal, B. P. (2020). Effect of high-power sonication pretreatment on extraction and some physicochemical properties of proteins from chickpea, kidney bean, and soybean. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 712–721. <https://doi.org/10.1016/j.IJBIOMAC.2019.12.118>
- Carrasco-Peña, L., Osuna-Castro, J. A., De León-Rodríguez, A., Maruyama, N., Toro-Vazquez, J. F., Morales-Rueda, J. A., & Barba De La Rosa, A. P. (2013). Modification of solubility and heat-induced gelation of Amaranth 11S Globulin by protein engineering. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(14), 3509–3516. <https://doi.org/10.1021/jf3050999>



- Cermeño, M., Silva, J. V. C., Arcari, M., & Denkel, C. (2024). Foaming properties of plant protein blends prepared using commercial faba bean and hemp protein concentrates at different faba bean/hemp protein ratios. *LWT*, 198, 115948. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115948>
- Chamizo-González, F., Heredia, F. J., Rodríguez-Pulido, F. J., González-Miret, M. L., & Gordillo, B. (2022). Proteomic and computational characterisation of 11S globulins from grape seed flour by-product and its interaction with malvidin 3-glucoside by molecular docking. *Food Chemistry*, 386, 132842. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132842>
- Chen, N., Zhao, Z., Wang, Y., & Dimova, R. (2020). Resolving the mechanisms of soy glycinin self-coacervation and hollow-condensate formation. *ACS Macro Letters*, 9(12), 1844–1852. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.0c00709>
- Chen, S., & Luo, X. (2024). Chia seed protein as a promising source for plant-based foods: Functional properties, processing methods and potential food applications. *Applied Food Research*, 4(2), 100459. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100459>
- Chirinos, R., Escobar-Mendoza, N., Figueroa-Merma, A., de Oliveira, T. V., Guzmán, F., Pedreschi, R., & Campos, D. (2023). Evaluation of the antihypertensive and antidiabetic potential of peptides from the globulin fraction of quinoa (*Chenopodium quinoa*) by an *in silico* and *in vitro* approach. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(8), 4386–4396. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16544>
- Contardo, I., Gutiérrez, S., Hurtado-Murillo, J., & Escobar, N. (2025). Understanding the structural differences in chickpea globulins and their relationship with *in vitro* protein digestibility. *Food Research International*, 202, 115702. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115702>
- Gravel, A., Dubois-Laurin, F., Turgeon, S. L., & Doyen, A. (2024). The role of the 7S/11S globulin ratio in the gelling properties of mixed β -lactoglobulin/pea proteins systems. *Food Hydrocolloids*, 156, 110273. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110273>
- Gul, O., Gul, L. B., Baskinci, T., Parlak, M. E., & Saricaoglu, F. T. (2023). Influence of pH and ionic strength on the bulk and interfacial rheology and technofunctional properties of hazelnut meal protein isolate. *Food Research International*, 169, 112906. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112906>
- Guo, R., Deng, X., Hu, Q., Zhu, Y., & Zhu, X. (2024). Soy protein gels based on ultrasonic treatment: Effects of Ca^{2+} and 11S/7S ratio on gel structures and digestive properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 111, 107143. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107143>



- Hasegawa, K., Matsumiya, K., Saeki, H., Matsumura, Y., & Nishimura, K. (2023). Emulsifying properties of glucose-conjugated soybean 11S globulin with maximum antioxidant capacity, obtained under optimal preparatory conditions identified by random-centroid optimization. *Food Science and Technology Research*, 29(1), 57–69. <https://doi.org/10.3136/fstr.FSTR-D-22-00169>
- Helmick, H., Jain, A., Terashi, G., Liceaga, A., Bhunia, A. K., Kihara, D., & Kokini, J. L. (2025). Bioinformatic approaches for characterizing molecular structure and function of food proteins. *Annual Review of Food Science and Technology*. 14, 203-224. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-060721>
- Hou, Y., Huang, L., Xing, G., Yuan, X., Zhang, X., Dai, D., Yuan, X., Chen, X., & Xue, C. (2025). Structure and functional properties of proteins from different soybean varieties as affected by the 11S/7S globulin ratio. *Foods*, 14(5), 755. <https://doi.org/10.3390/foods14050755>
- Hsiao, E. S. L., Li-Jen, L. I. N., Li, F. Y., Wang, M. M. C., Liao, M. Y., & Tzen, J. T. C. (2006). Gene families encoding isoforms of two major sesame seed storage proteins, 11S globulin and 2S albumin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(25), 9544–9550. <https://doi.org/10.1021/jf061505x>
- Ince, C., Condict, L., Stockmann, R., Ashton, J., & Kasapis, S. (2025). Molecular characterisation of interactions between 11S glycinin and hexanal – An off-flavour compound. *Food Hydrocolloids*, 158, 110543. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110543>
- Ishaq, A., Irfan, S., Sameen, A., & Khalid, N. (2022). Plant-based meat analogs: A review with reference to formulation and gastrointestinal fate. In *Current Research in Food Science*. 5, 973–983. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.06.001>
- Jeyaraj, G., Rajendran, A. K., Sathishkumar, K. K., Almutairi, B., Vadivelu, A., Chokkakula, S., & Xie, W. (2025). High-resolution protein modeling through Cryo-EM and AI: Current trends and future perspectives – a review. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 12, 1688455. <https://doi.org/10.3389/FMOLB.2025.1688455>
- Johansson, M., Karkehabadi, S., Johansson, D. P., & Langton, M. (2023). Gelation behaviour and gel properties of the 7S and 11S globulin protein fractions from faba bean (*Vicia faba* var. *minor*) at different NaCl concentrations. *Food Hydrocolloids*, 142, 108789. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108789>
- Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., Tunyasuvunakool, K., Bates, R., Židek, A., Potapenko, A., Bridgland, A., Meyer, C., Kohl, S. A. A., Ballard, A. J., Cowie, A., Romera-Paredes, B., Nikolov, S., Jain, R., Adler, J., ... Hassabis, D. (2021). Highly accurate protein structure predic-



- tion with AlphaFold. *Nature*, 596(7873), 583–589. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03819-2>
- Kang, Z. L., Zhang, X. hua, Li, X., Song, Z. jun, Ma, H. jun, Lu, F., Zhu, M. ming, zhao, S. ming, & Wang, Z. rong. (2021). The effects of sodium chloride on proteins aggregation, conformation and gel properties of pork myofibrillar protein running head: Relationship aggregation, conformation and gel properties. *Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 2258–2264. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04736-4>
- Karch, K. R., Snyder, D. T., Harvey, S. R., & Wysocki, V. H. (2022). Native mass spectrometry: Recent progress and remaining challenges. *Annual Review of Biophysics*, 51, 157–179. <https://doi.org/10.1146/annurev-biophys-092721>
- Kerezsi, A. D., Jacquet, N., & Blecker, C. (2022). Advances on physical treatments for soy allergens reduction - A review. *Trends in Food Science and Technology*, 122, 24–39. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.007>
- Khalid, W., Arshad, M. S., Aziz, A., Rahim, M. A., Qaisrani, T. B., Afzal, F., Ali, A., Ranjha, M. M. A. N., Khalid, M. Z., & Anjum, F. M. (2023). Chia seeds (*Salvia hispanica* L.): A therapeutic weapon in metabolic disorders. *Food Science and Nutrition*, 11(1), 3–16, 20487177. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3035>
- Kim, W., Yiu, C. C. Y., Wang, Y., Zhou, W., & Selomulya, C. (2024). Toward diverse plant proteins for food innovation. *Advanced Science*, 11(38), 2408150. <https://doi.org/10.1002/advs.202408150>
- Kohli, V., & Singha, S. (2024). Protein digestibility of soybean: How processing affects seed structure, protein and non-protein components. *Discover Food*, 4(7). <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00076-w>
- Li, C., Li, M., Dunwell, J. M., & Zhang, Y. M. (2012). Gene duplication and an accelerated evolutionary rate in 11S globulin genes are associated with higher protein synthesis in dicots as compared to monocots. *BMC Evolutionary Biology*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2148-12-15>
- Li, R., True, A. D., Sha, L., & Xiong, Y. L. (2025). Structure–functionality relationship and modification strategies of oat protein: Challenges and opportunities. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(1), e70091. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70091>
- Ma, L., Li, B., Han, F., Yan, S., Wang, L., & Sun, J. (2015). Evaluation of the chemical quality traits of soybean seeds, as related to sensory attributes of soymilk. *Food Chemistry*, 173, 694–701. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.096>



- Martineau-Côté, D., Achouri, A., Karboune, S., & L'Hocine, L. (2022). Faba bean: An untapped source of quality plant proteins and bioactives. *Nutrients*, 14(8), 1541. <https://doi.org/10.3390/nu14081541>
- Martínez, J. H., Velázquez, F., Burrieza, H. P., Martínez, K. D., Paula Domínguez Rubio, A., dos Santos Ferreira, C., del Pilar Buera, M., & Pérez, O. E. (2019). Betanin loaded nanocarriers based on quinoa seed 11S globulin. Impact on the protein structure and antioxidant activity. *Food Hydrocolloids*, 87, 880–890. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.09.016>
- Medina-Godoy, S., Rodríguez-Yáñez, S. K., Bobadilla, N. A., Pérez-Villalva, R., Valdez-Ortiz, R., Hong, E., Luna-Suárez, S., Paredes-López, O., & Valdez-Ortiz, A. (2013). Antihypertensive activity of AMC3, an engineered 11S amaranth globulin expressed in *Escherichia coli*, in spontaneously hypertensive rats. *Journal of Functional Foods*, 5(3), 1441–1449. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.06.001>
- Montoya-Rodríguez, A., Gómez-Favela, M. A., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J., & González de Mejía, E. (2015). Identification of bioactive peptide sequences from amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) seed proteins and their potential role in the prevention of chronic diseases. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(2), 139–158. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12125>
- Mordor Intelligence. (2026). Hydrolyzed vegetable protein market size and share.
- Nardo, A. E., Añón, M. C., & Quiroga, A. V. (2020). Identification of renin inhibitors peptides from amaranth proteins by docking protocols. *Journal of Functional Foods*, 64, 103683. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103683>
- Orsini Delgado, M. C., Nardo, A., Pavlovic, M., Rogniaux, H., Añón, M. C., & Tironi, V. A. (2016). Identification and characterization of antioxidant peptides obtained by gastrointestinal digestion of amaranth proteins. *Food Chemistry*, 197, 1160–1167. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.092>
- Pengyu, Z., Yang, Y., Ling, Z., Jian, G., Bing, W., Xin, B., Dehui, Y., Linlin, L., Congyu, L., & Na, Z. (2021). The effect of trehalose on the thermodynamic stability and emulsification of soybean 11S globulin in the molten globule state. *Food Hydrocolloids*, 118, 106811. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106811>
- Pi, X., Sun, Y., Fu, G., Wu, Z., & Cheng, J. (2021). Effect of processing on soybean allergens and their allergenicity. *Trends in Food Science and Technology*, 118, 316–327. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.006>
- Quiroga, A. V., Barrio, D. A., & Añón, M. C. (2015). Amaranth lectin presents potential antitumor properties. *LWT*, 60(1), 478–485. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.035>



- Rasheed, F., Markgren, J., Hedenqvist, M., & Johansson, E. (2020). Modeling to understand plant protein structure-function relationships—implications for seed storage proteins. *Molecules*, 25(4), 873. <https://doi.org/10.3390/molecules25040873>
- Ren, H. Bin, Feng, B. L., Liu, H. Y., Wang, Y. T., Zhang, H. T., Li, Z. L., Meng, L., Zhang, J. J., Bai, X. Sen, Gao, F., Wang, Z. P., Luo, B. W., Chen, X. L., Song, H. J., Yan, X. X., Zhao, J. Y., & Zhang, Y. H. (2024). A novel approach has been developed to produce pure plant-based gel soy yogurt by combining soy proteins (7S/11S), high pressure homogenization, and glycation reaction. *Food Chemistry*, 22(101259). <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101259>
- Ren, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Pan, T., Duan, E., Bao, X., Zhu, J., Teng, X., Zhang, P., Gu, C., Dong, H., Wang, F., Wang, Y., Bao, Y., Wang, Y., & Wan, J. (2022). Endomembrane-mediated storage protein trafficking in plants: Golgi-dependent or Golgi-independent? *FEBS Letters*, 596(17), 2215–2230. <https://doi.org/10.1002/1873-3468.14374>
- Rivera del Rio, A., Boom, R. M., & Janssen, A. E. M. (2022). Effect of Fractionation and Processing conditions on the digestibility of plant proteins as food ingredients. *Foods*, 11(6), 870. MDPI. <https://doi.org/10.3390/foods11060870>
- Salaria, S., Boatwright, J. L., Thavarajah, P., Kumar, S., & Thavarajah, D. (2022). Protein Biofortification in lentils (*Lens culinaris* Medik.) toward human health. *Frontiers in Plant Science*, 13, 869713. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.869713>
- San Pablo-Osorio, B., Mojica, L., & Uriás-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-López, F., Robles-Olvera, V. J., Hidalgo-Morales, M., & Tsopmo, A. (2021). Angiotensin-I converting enzyme inhibitory activity of *Amaranthus hypochondriacus* seed protein hydrolysates produced with lactic bacteria and their peptidomic profiles. *Food Chemistry*, 363, 130320. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130320>
- Santamaria, L., Pajak, A., House, J. D., & Marsolais, F. (2024). Identification and characterization of a pepsin- and chymotrypsin-resistant peptide in the α subunit of the 11S globulin legumin from common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(26), 14844–14850. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c08744>
- Santos, J. S., Durso, A. C., da Silva, C. A. S., & de Castro Santana, R. (2024). Scientific mapping of chia protein research: State of the art and future trends. *Foods*, 13(24), 4181. <https://doi.org/10.3390/foods13244181>



- Senna, C., Soares, L., Egea, M. B., & Fernandes, S. S. (2024). The techno-functionality of chia seed and its fractions as ingredients for meat analogs. *Molecules*, 29(2), 440. <https://doi.org/10.3390/molecules29020440>
- Sim, S. Y. J., Sriv, A., Chiang, J. H., & Henry, C. J. (2021). Plant proteins for future foods: A roadmap. *Foods*, 10(8), 1967. <https://doi.org/10.3390/foods10081967>
- Srenuja, D., Hema, V., Anand, M. T., Mohan, R. J., & Vidyalakshmi, R. (2023). Kidney bean: Protein's treasure trove and creates avenues for a healthy lifestyle. *Legume Science*, August 2022, 1–19, 26396181. <https://doi.org/10.1002/leg3.193>
- Stofella, M., Grimaldi, A., Smit, J. H., Claesen, J., Paci, E., & Sobott, F. (2024). Computational tools for hydrogen-deuterium exchange mass spectrometry data analysis. *Chemical Reviews*, 124(21), 12242–12263. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00438>
- Sui, X., Zhang, T., Zhang, X., & Jiang, L. (2024). High-moisture extrusion of plant proteins: Fundamentals of texturization and applications. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15, 125–149. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023>
- Sun, X., Sun, Y., Li, Y., Wu, Q., & Wang, L. (2021). Identification and characterization of the seed storage proteins and related genes of *Cannabis sativa* L. *Frontiers in Nutrition*, 8, 678421. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.678421>
- Tamara, S., Den Boer, M. A., & Heck, A. J. R. (2022). High-resolution native mass spectrometry. *Chemical Reviews*, 122(8), 7269–7326. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00212>
- Tandang-Silvas, M. R., Cabanos, C. S., Carrasco Peña, L. D., De La Rosa, A. P. B., Osuna-Castro, J. A., Utsumi, S., Mikami, B., & Maruyama, N. (2012). Crystal structure of a major seed storage protein, 11S proglubulin, from *Amaranthus hypochondriacus*: Insight into its physico-chemical properties. *Food Chemistry*, 135(2), 819–826. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.04.135>
- Tandang-Silvas, M. R., Tecson-Mendoza, E. M., Mikami, B., Utsumi, S., & Maruyama, M. (2011). Molecular design of seed storage proteins for enhanced food physicochemical properties. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2, 59–73. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022510-133718>
- Tandang-Silvas, M. R. G., Fukuda, T., Fukuda, C., Prak, K., Cabanos, C., Kimura, A., Itoh, T., Mikami, B., Utsumi, S., & Maruyama, N. (2010). Conservation and divergence on plant seed 11S globulins based on crystal structures. *Biochimica et Biophysica Acta - Proteins and Proteomics*, 1804(7), 1432–1442. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2010.02.016>



- Tang, J., Yao, D., Xia, S., Cheong, L., & Tu, M. (2024). Recent progress in plant-based proteins: From extraction and modification methods to applications in the food industry. *Food Chemistry: X*, 23, 101540. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101540>
- Van Drie, J. H., & Tong, L. (2020). Cryo-EM as a powerful tool for drug discovery. *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 30(22), 127524. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2020.127524>
- Vidal Torres, E., Valencia, E., Simsek, S., & Ramírez, A. M. L. (2024). Amaranth: Multipurpose agroindustrial crop. *Agronomy*, 14(10), 2323. <https://doi.org/10.3390/agronomy14102323>
- Vilcacundo, R., Martínez-Villaluenga, C., Miralles, B., & Hernández-Ledesma, B. (2019). Release of multifunctional peptides from kiwicha (*Amaranthus caudatus*) protein under *in vitro* gastrointestinal digestion. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1225–1232. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9294>
- Villanueva, A., Rivero-Pino, F., Martin, M. E., Gonzalez-De la Rosa, T., Montserrat-De la Paz, S., & Millan-Linares, M. C. (2024). Identification of the bioavailable peptidome of chia protein hydrolysate and the *in silico* evaluation of its antioxidant and ACE inhibitory Potential. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(6), 3189–3199. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c05331>
- Vitale, A., & Pedrazzini, E. (2022). StresSeed: The unfolded protein response during seed development. *Frontiers in Plant Science*, 13, 869008. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.869008>
- Wang, Y., Hernández-Alvarez, A. J., Goycoolea, F. M., & Martínez-Villaluenga, C. (2024). A comparative study of the digestion behavior and functionality of protein from chia (*Salvia hispanica* L.) ingredients and protein fractions. *Current Research in Food Science*, 8, 100684. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100684>
- Withana-Gamage, T. S., Hegedus, D. D., Qiu, X., & Wanasundara, J. P. D. (2011). *In silico* homology modeling to predict functional properties of cruciferin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(24), 12925–12938. <https://doi.org/10.1021/jf201979a>
- Withana-Gamage, T. S., Hegedus, D. D., McIntosh, T. C., Coutu, C., Qiu, X., & Wanasundara, J. P. D. (2020). Subunit composition affects formation and stabilization of o/w emulsions by 11S seed storage protein cruciferin. *Food Research International*, 137, 109387. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109387>
- Wu, D. T., Li, W. X., Wan, J. J., Hu, Y. C., Gan, R. Y., & Zou, L. (2023). A comprehensive review of pea (*Pisum sativum* L.): Chemical composition, proces-



- sing, health benefits, and food applications. *Foods*, 12(13), 2527. <https://doi.org/10.3390/foods12132527>
- Xiao, T., Roland, I. S., Nielsen, S. D. H., Le, T. T., Olesen, E., Larsen, L. B., & Poulsen, N. A. (2025). Variation in composition of storage proteins, minor proteins and amino acids across faba bean cultivars. *Food Chemistry*, 483, 144225. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144225>
- Xu, J., Chen, Q., Qiu, Y., Wang, Z., Zeng, M., Qin, F., Chen, J., & He, Z. (2025). Competitive binding of flavors in the preparation of soy protein: Screening based on molecular docking. *Food Chemistry*, 475, 143279. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143279>
- Yang, T., Wu, X., Wang, W., & Wu, Y. (2023). Regulation of seed storage protein synthesis in monocot and dicot plants: A comparative review. *Molecular Plant*, 16(1), 145–167. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2022.12.004>
- Yang, Y., Sun, S. hui, Zou, L., Wang, B., Bian, X., Zhu, P. yu, Ren, L. kun, Shi, Y. guo, & Zhang, N. (2022). Characterization of structural and functional properties of soybean 11S globulin during the renaturation after the guanidine hydrochloride denaturation. *Food Hydrocolloids*, 130, 107715. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107715>
- Yaputri, B. P., Feyzi, S., & Ismail, B. P. (2024). Transglutaminase-induced polymerization of pea and chickpea protein to enhance functionality. *Gels*, 10(1), 11. <https://doi.org/10.3390/gels10010011>
- Zhang, X., Liu, Z., Ma, X., Zheng, Y., Hu, H., Jiao, B., McClements, J., Wang, Q., & Shi, A. (2024). Interfacial and foaming properties of plant proteins: Comparison of structure-function behavior of different plant proteins. *SSRN*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4906731>



Tortillas de maíz azul fortificadas con soya texturizada: impacto en el contenido proteico y capacidad antioxidante

Fortified blue corn tortillas with texturized soybean: impact on protein content and antioxidant capacity

Liliana León López¹, Barbara Raquel Martínez Valenzuela², Luis Martín Sánchez Magaña¹, Saraid Mora Rochin^{1,2*}, Jesús Aguayo Rojas³, Cuauhtémoc Reyes Moreno^{1,2}, Claudia del Rosario León Sicaños¹

¹ Programa de Posgrado Integral en Biotecnología, Facultad de Ciencias Químico Biológicas (FCQB), Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS). Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, C.P. 80030, México.

² Licenciatura en Biotecnología Genómica, FCQB-UAS. Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, C.P. 80030, México.

³ Laboratorio en Química de Alimentos, Universidad Autónoma de Zacatecas, Carretera Zacatecas-Guadalajara Km 6, La Escondida, Zacatecas, Zacatecas, CP.98160. México.

*Autor de correspondencia: smora@uas.edu.mx

Resumen

Palabras clave:

tortillas de maíz azul, soya, proteínas, fenólicos, actividad antioxidante.

El estudio evaluó el impacto nutricional y antioxidante de tortillas de maíz azul fortificadas con 30% de harina de soya texturizada (proporción 70:30). Las determinaciones de composición química, antocianinas, fenólicos y actividad antioxidante total (ORAC y ABTS) se realizaron por triplicado. La fortificación favoreció incrementos significativos del 79% en proteína (11.37 a 20.36%), del 13.8% en cenizas (1.52 a 1.73%), del 32% en fenólicos totales (173.99 a 229.37 mg EAG/100 g) y del 20% en el potencial antioxidante determinado por ORAC (8,376.43 a 10,083.05 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$) y ABTS (5,746.73 a 6,861.43 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g}$), sin afectar la estabilidad de las antocianinas. La fracción fenólica insoluble superó el 84% del total, sugiriendo un potencial efecto prebiótico y antioxidante a nivel del colon. Estos hallazgos confirman que la soya texturizada es una estrategia tecnológica factible para fortificar tortillas tradicionales, ofreciendo una alternativa efectiva para mitigar deficiencias nutricionales y trastornos cardiovasculares.

Abstract

Keywords:

blue corn tortillas, soy, protein, phenolics, antioxidant activity.

The study investigated the impact of enriching blue corn tortillas with 30% textured soy flour (in a 70:30 ratio) on their nutritional and antioxidant properties. Analyses of the chemical composition, including anthocyanins and phenolics, and antioxidant activity were conducted via ORAC and ABTS assays in triplicate. Fortification resulted in significant increases: protein by 79% (from 11.37 to 20.36%), ash by 13.8% (from 1.52 to 1.73%), and total phenolics by 32% (from 173.99 to 229.37 mg GAE/100g). Antioxidant capacity improved by 20%, as shown by ORAC (8,376.43 to 10,083.05 $\mu\text{mol TE}/100\text{g}$) and ABTS (5,746.73 to 6,861.43 $\mu\text{mol TE}/100\text{g}$). Anthocyanin stability remained unaffected. Notably, 84% of phenolics were found in the insoluble fraction, which may help support prebiotic and antioxidant activity in the colon. Overall, the results suggest that incorporating textured soy into regular tortillas is a practical way to enhance nutrition and support heart health.

Recibido: 28 de octubre 2025
Revisado: 20 de diciembre 2025
Aceptado: 30 de diciembre 2025
Publicado: 23 de febrero 2026



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 maíz (*Zea mays* L.), cuyo nombre prehispánico significa “lo que sustenta la vida”, ha sido históricamente el grano básico de la dieta de México y Centroamérica (Kato et al., 2009). Aunque el maíz blanco sigue siendo el más consumido, las variedades pigmentadas han incrementado su aceptación en México y en Estados Unidos debido a sus beneficios funcionales. Numerosos estudios se han enfocado en las variedades azules y moradas, reconocidas por su alto contenido de antocianinas y compuestos fenólicos, responsables de propiedades antioxidantes, antihipertensivas, antimicrobianas, antiinflamatorias y anticancerígenas (Urias-Lugo et al., 2015; Herrera-Sotero et al., 2017; Bon-Padilla et al., 2022; Mora-Rochin et al., 2025). Además, estas variedades presentan un mayor contenido proteico en comparación con los maíces blancos y amarillos (Serna-Saldívar et al., 2011; Mora-Rochin et al., 2016; Herrera-Sotero et al., 2017; Ramos et al., 2024).

La tortilla tradicional, principal forma de consumo del maíz en México y Centroamérica, se obtiene mediante el proceso ancestral de nixtamalización, que induce transformaciones estructurales y bioquímicas favorables en el grano (Santiago-Ramos et al., 2018; Palacios-Pola et al., 2021). Entre ellas destacan la remoción eficiente del pericarpio —fracción rica en polifenoles—, la gelatinización parcial del almidón, el enriquecimiento en calcio y el aumento en la biodisponibilidad de niacina, y de aminoácidos esenciales como la lisina y el triptófano (Bressani et al., 1990; Ortega et al., 1986). No obstante, aunque la calidad biológica de la proteína mejora (elevando su valor biológico del 45% al 75%), el proceso de nixtamalización también conlleva una lixiviación significativa de nutrientes totales hacia el nejayote. Se han reportado pérdidas de proteínas (1-18%), vitaminas (29-46%), minerales (59% en hierro) y compuestos fenólicos (>50%), lo que puede comprometer la calidad nutricional de la tortilla nixtamalizada (Figueroa-Cárdenas et al., 2001; Santiago-Ramos et al., 2018; Astorga-Gaxiola et al., 2025; Félix-Sámano et al., 2025; Sánchez-Magaña et al., 2025). Por otro lado, el contenido neto de lisina y triptófano disminuye entre 32% y 38% debido a la pérdida de las fracciones de albúmina y globulina (Rojas-Molina et al., 2008). Esta degradación nutricional, impide que la tortilla tradicional alcance los requerimientos recomendados por organismos internacionales, manteniendo a estos aminoácidos como factores limitantes (Milán-Carrillo et al., 2006; FAO/OMS, 2007; Sánchez-Magaña et al., 2025).

Ante este déficit, resulta pertinente la fortificación de la tortilla mediante la incorporación de soya texturizada como una estrategia de mejora nutricional altamente eficaz, debido a que la soya es rica en proteína (40–45%), y en los aminoácidos limitantes del maíz (lisina y triptófano) (Nguyen et al., 2023; Tyug-Tang et al., 2023). Este producto es obtenido mediante extrusión termoplástica a partir de harina de soya, concentra-



dos o aislados proteicos (Maung et al., 2020). Una de las principales ventajas de la soya texturizada radica en que, tras su hidratación y preparación, adquiere una textura fibrosa similar a la de la carne de res, pollo o productos del mar, lo que la convierte en un análogo funcional y sensorialmente aceptable de la proteína animal. Aunado a esto, la soya texturizada posee un bajo contenido de lípidos, y junto con su bajo costo de producción, la posiciona como un ingrediente estratégico para el desarrollo de alimentos destinados a poblaciones con limitado acceso a fuentes de proteína de alta calidad biológica (Liu et al., 2023; Nguyen et al., 2023).

En este contexto, resulta pertinente explorar la soya texturizada como una estrategia de mejora nutricional para alimentos de alto consumo cotidiano como es la tortilla. Además, la soya posee un bajo índice glicémico y un aporte significativo de minerales, vitaminas y fibra dietética (Tyug-Tang et al., 2023). Contiene compuestos bioactivos como los fenólicos, siendo las isoflavonas las más abundantes y reconocidas por sus propiedades antioxidantes y su capacidad para actuar como fitoestrógenos (Alves-Macedo et al., 2023). Diversos estudios han señalado que el consumo de 25 g diarios de soya puede contribuir a la prevención de enfermedades crónicas, como ciertos tipos de cáncer, obesidad, diabetes tipo 2, así como a la mitigación de síntomas asociados a la menopausia (Tyug-Tang et al., 2023).

Estudios previos han demostrado que la fortificación de tortillas con derivados de soya, incrementa significativamente el contenido proteico y mejora propiedades reológicas de la masa, lo que resulta en tortillas con mayor suavidad, flexibilidad y capacidad de enrollado, características que se atribuyen a su mayor contenido de humedad derivado de la fortificación (Collins & Sánchez, 1980; Figueroa-Cárdenas et al., 2001; Chuck-Hernández et al., 2015). Sin embargo, la evidencia científica se ha centrado mayoritariamente en maíces blancos, evaluando principalmente la digestibilidad y el perfil de aminoácidos (Acevedo-Pacheco & Serna-Saldívar, 2016). Esta limitación subraya la necesidad de investigar el impacto de la fortificación en variedades pigmentadas, como el maíz azul, que destaca por su potencial nutracéutico debido a su contenido de compuestos bioactivos. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo desarrollar tortillas de maíz azul fortificadas con harina de soya texturizada para lograr una complementación proteica estratégica y evaluar, por primera vez, el impacto de esta adición sobre la capacidad antioxidante del producto final.

Materiales y Métodos

Materiales

El maíz azul híbrido cosecha 2024 del estado de Sinaloa fue adquirido de un supermercado local en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, y utilizado como material de estudio.



Después de la colecta, los granos fueron almacenados a temperatura de refrigeración. La soya texturizada de la marca Soi-Yah!, fue adquirida en un mercado local de Culiacán.

Métodos

Proceso tradicional de nixtamalización

El proceso de nixtamalización fue realizado de acuerdo con lo descrito por Mora-Rochin et al. (2010). Granos de maíz azul en lotes de 500 g fueron sometidos a cocción durante 31 min en una solución de cal [5.4 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por L de agua] a 85 °C, utilizando una proporción de 1:3 (peso/volumen), seguida de un reposo de 8 h. Posteriormente, el líquido de cocción o nejayote fue descartado y el nixtamal (maíz cocido en cal) fue lavado tres veces con agua destilada. Finalmente, el grano cocido fue llevado a un proceso de secado a 55 °C durante 12 h, para posteriormente ser molido y obtener una harina fina que pasó por una malla 80 (0.180 mm). Las harinas resultantes fueron almacenadas en bolsas de plástico herméticas a -20 °C hasta su uso.

Para la obtención de harina de soya texturizada, la muestra fue pasada por un molino hasta obtener una harina fina que pasó por malla 80 (0.180 mm). La harina de soya fue almacenada en bolsa de polietileno a -20 °C hasta su uso.

Elaboración de tortillas a partir de harinas de maíz azul nixtamalizado adicionadas con harina de soya

Las tortillas fueron preparadas mezclando 200 g de harina de maíz azul nixtamalizado + harina de soya (en una proporción 70:30) con 200 mL de agua hasta alcanzar una consistencia adecuada para la producción de tortillas. La masa fresca (30 g por tortilla) fue moldeada en forma de disco plano con una máquina manual. Los discos de masa fueron sometidos a procesos de cocción en un comal caliente a 290 ± 10 °C por 27 s de un lado, 30 s en la otra cara. Posteriormente, fueron invertidas otra vez hasta su expansión (Sánchez-Magaña et al., 2025). Asimismo, para hacer comparaciones fue necesario elaborar una tortilla con 100% de harina de maíz azul nixtamalizado o tortilla tradicional (T), utilizando la misma metodología mencionada anteriormente.

Obtención de harinas de tortillas

Las tortillas obtenidas de maíz azul adicionadas con harina de soya texturizada y las tortillas tradicionales fueron enfriadas a temperatura ambiente y posteriormente llevadas a un proceso de secado a 55 °C durante 12 h, para ser sometidas a molienda para la obtención de una harina fina que pasó por malla 80 (0.180 mm). Las harinas fueron guardadas en bolsas de polietileno selladas y almacenadas (4 °C) hasta su utilización.



Composición química proximal

La caracterización de la composición química proximal de las tortillas en estudio fue de acuerdo con los métodos de la AOAC (2005). La humedad (método 925.10) de las harinas fue obtenida por secado de las muestras a 120 °C durante 24 h. El contenido de proteína (método 920.87) fue obtenido utilizando el método micro-Kjeldahl (Nx6.25). Mientras que los lípidos (método 925.39) fueron determinados usando un aparato Soxhlet utilizando éter de petróleo como disolvente. Las cenizas (método 923.03) fueron obtenidas por incineración de las muestras a 550 °C y, finalmente, el contenido de carbohidratos fue calculado por diferencia de todos los parámetros, mientras que el contenido calórico (Kcal) fue calculado con la ecuación 1. Todas las determinaciones fueron expresadas en porcentaje de base seca.

$$\text{Kcal} = [(4 \text{ Kcal} \times \text{g carbohidratos}) + (4 \text{ Kcal} \times \text{g proteína}) + (9 \text{ Kcal} \times \text{g lípidos})] \quad (1)$$

Determinación de antocianinas totales

Para la cuantificación de antocianinas totales fue utilizado el método reportado por Abdel-Aal & Hucl (1999) con ligeras modificaciones. Una muestra de 0.05 g fue homogeneizada con 1 mL de metanol frío acidificado (95% metanol y 1 N HCl, 85:15, v/v). La mezcla fue agitada durante 10 min y centrifugada a 3000 g x 10 min. El sobrenadante fue recolectado para el registro de absorbancia a 535 nm y 700 nm en un lector de microplacas (Synergy HT, Biotek Instrument). El contenido de antocianinas fue expresado como mg equivalentes de cianidina-3-glucósido (ECG) / 100 g en base seca (bs). Para el cálculo de la concentración fue utilizado el coeficiente de extinción molar (ϵ) de 25,965 Abs/M x cm, y un peso molecular (PM) de 449.2 g/mol de acuerdo con la ecuación 2:

$$C = \left[\left(\frac{A_{535 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}}}{\epsilon} \right) \times (\text{volumen total de extracto}) \times \text{PM} \right] / (\text{peso de la muestra}) \quad (2)$$

Dónde: C: concentración total de antocianina (mg equivalentes de cianidina-3-glucósido por g de muestra) ϵ : absorción molar (cianidina-3-glucósido = 25965 cm⁻¹ M⁻¹) PM: peso molecular de cianidina-3-glucósido (449.2 g/mol)

Determinación de fenólicos solubles e insolubles

La extracción de las fracciones de fenólicos solubles e insolubles fue realizada de acuerdo a lo reportado por Mora-Rochin et al. (2010). Para la obtención de la fracción soluble se añadió 1 g de harina de tortilla a 10 mL de una solución fría de etanol-agua (80:20, v/v) y se agitó durante 10 min. Las muestras fueron centrifugadas



a 2500 g x 10 min. Los sobrenadantes de cada muestra fueron concentrados a un volumen final de 2 mL bajo condiciones de vacío a 45 °C. Los extractos obtenidos fueron almacenados a -20 °C hasta ser analizados.

Para la fracción de fenólicos insolubles fue tomado el residuo o pellet del extracto soluble, el cual fue digerido por 1 h con 10 mL de NaOH 2 mol/L en baño maría a 95 °C durante 30 min, seguido de agitación durante 1 h a temperatura ambiente. La mezcla fue acidificada con HCl, y para la remoción de lípidos de las muestras fue utilizado hexano. El residuo final fue extraído cinco veces con acetato de etilo. Finalmente, las fracciones de acetato de etilo se combinaron y fueron llevadas a sequedad a bajas presiones a 45 °C. Los extractos fenólicos insolubles fueron reconstituidos con 2 mL de metanol al 50% y almacenados a -20 °C hasta su uso. Todas las extracciones fueron realizadas por triplicado.

La cuantificación de fenólicos de cada fracción fue realizada con la técnica colorimétrica de Folin-Ciocalteu descrita por Singleton et al. (1999) con registros de absorbancia a 750 nm en un lector de microplacas (Synergy™ HT Multi-Detection BioTek Inc., Winooski, VT). Los resultados fueron expresados como mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g en base seca (bs).

Determinación de la actividad antioxidante

La actividad antioxidante fue determinada por el método de capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC, por sus siglas en inglés), usando diluciones adecuadas de los extractos de fenólicos solubles e insolubles en solución amortiguadora de fosfatos 75 mmol/L. En una placa negra de 96 pozos fueron colocados 25 µL de cada dilución y se mezclaron con 150 µL de fluoresceína 0.1 mmol/L. Para inducir la pérdida de la fluoresceína fueron añadidos 25 µL del generador de radicales libres AAPH 200 mmol/L. Después de una incubación por 30 min a 37 °C, la fluorescencia fue registrada cada 2 min por 1 h a 485 nm de excitación y 538 nm de emisión, utilizando un lector de microplacas (Synergy HT Multi-Detection Microplate Reader; Bio Tek Instruments, Inc., Winooski, VT, USA). Los resultados se expresaron como micromol (µmol) equivalentes de Trolox (ET)/100 g de base seca (bs) (Mora-Rochin et al., 2010).

El método del radical ABTS* fue realizado por medio de la oxidación de 2 mM de ABTS con una solución de 2.45 mM de persulfato de potasio durante 12 h. La absorbancia de todas las muestras con el radical ABTS* fue registrada a 734 nm en un lector de microplacas (Synergy HT Multi-Detection Microplate Reader; BioTek Instruments, Inc., Winooski, VT, USA) 6 min posterior a la mezcla inicial (Re et al., 1999). Fue construida una curva estándar de Trolox como control en ambos



ensayos. La capacidad antioxidante fue reportada como μmol equivalentes de Trolox (ET)/100 g en base seca (bs).

Análisis estadístico

Los datos se expresaron como la media $\pm$ desviación estándar. El análisis estadístico y la comparación de medias se realizaron utilizando el paquete estadístico MINITAB (versión 19). Para determinar diferencias significativas entre las dos muestras (TT y TF), se aplicó una prueba t de Student para muestras independientes con un nivel de significancia de 0.05

Resultados y Discusión

Composición química proximal de tortillas de maíz azul

La Tabla 1 muestra la composición química proximal (en %, base seca) de la Tortilla Tradicional (TT) y la Tortilla Fortificada (TF) con harina de soya texturizada. Los resultados demostraron que la TF (20.36 ± 0.26) presenta un contenido proteico 1.8 veces superior al de la TT (11.37 ± 0.37). Esta diferencia fue altamente significativa ($p < 0.0001$), confirmando la efectividad de la soya texturizada como agente de fortificación.

Tabla 1. Resultados de la composición química proximal de tortillas de maíz azul

Tortilla de maíz azul		
Parámetro	Tradicional (TT)	Fortificada (TF)
Proteína	$11.37 \pm 0.37b$	$20.36 \pm 0.26a$
Lípidos	$4.03 \pm 0.10a$	$3.29 \pm 0.044b$
Cenizas	$1.52 \pm 0.05b$	$1.73 \pm 0.05a$
Carbohidratos	$83.06 \pm 0.29a$	$74.62 \pm 0.32b$
Calorías	$414.07 \pm 0.71a$	$409.51 \pm 0.12b$

Las medias fueron separadas por columnas aplicando la prueba de t de Student.

Medias con la misma letra son diferentes ($p < 0.05$).

Los resultados son expresados como porcentaje (%).

TT= Tortilla tradicional; TF= Tortilla fortificada

Fuente: Elaboración propia

Este notable aumento se atribuye directamente a la alta concentración proteica de la soya desgrasada. Wittmann et al. (2024) reportaron que este subproducto de soya texturizada contiene hasta 52.80% de proteína, lo que confirma su eficacia como ingrediente fortificante. Aunque otros estudios han validado el uso de leguminosas, los resultados de la presente investigación superan lo reportado por Sánchez-Magaña et al. (2025), quienes lograron un incremento del 48% al fortificar tortillas con



harina de lenteja, y por Bon-Padilla et al. (2022), quienes reportaron incrementos menores (13.27%) con garbanzo extruido.

Es importante contextualizar que el contenido de proteína de la TT (11.37%) se encuentra dentro del rango reportado por otros autores (9 a 12.9%) para tortillas tradicionales (Astorga-Gaxiola et al., 2023; Salinas-Moreno et al., 2024; Sánchez-Magaña et al., 2025). Sin embargo, es necesario destacar que las variaciones en la proteína de la tortilla tradicional pueden deberse a factores como la variedad de maíz utilizado y las condiciones específicas del proceso de nixtamalización (Astorga-Gaxiola et al., 2023).

La fortificación impactó significativamente otros componentes proximales. El contenido de cenizas mostró un aumento significativo del 13.8% en la TF (1.73 ± 0.05) respecto a la TT (1.52 ± 0.05). Este incremento se justifica por el mayor contenido mineral de la soya (aproximadamente 4.8% de cenizas, según Tyug-Tan et al., 2023), además del calcio residual del proceso de nixtamalización.

En contraparte, la fortificación con soya en la tortilla (TF) disminuyó significativamente ($p < 0.05$) el contenido de lípidos en un 18.36% (3.29 ± 0.04 vs. 4.03 ± 0.10 g/100 g), los carbohidratos en un 10.16% (74.62 ± 0.32 vs. 83.06 ± 0.29 g/100 g) y el aporte calórico en un 1.1% (409.51 ± 0.12 vs. 414.07 ± 0.71 kcal/100 g) en comparación con la tortilla tradicional (Tabla 1). Estos decrementos en la TF se explican, primero, por un efecto de dilución de los carbohidratos ante el notable incremento de los niveles de proteína y cenizas. Segundo, la reducción del aporte lipídico es atribuible al bajo contenido de grasa de la soya texturizada empleada (0.52%, según Wittmann et al., 2024). Estos resultados son consistentes con la literatura, donde se han reportado incrementos en cenizas (7–43%) y disminuciones en lípidos (36%) y carbohidratos (7.52%) al fortificar tortillas con diversas leguminosas (Treviño-Mejía et al., 2016; Bon-Padilla et al., 2022; Sánchez-Magaña et al., 2025).

En este estudio se desarrolló una tortilla con un elevado contenido proteico mediante la incorporación de harina de soya texturizada. Los hallazgos demuestran que esta fortificación representa una alternativa viable, económica y sustentable para enriquecer un alimento básico en la dieta mexicana. Ante las pérdidas de nutrientes críticos (proteínas y vitaminas) derivadas de la lixiviación durante la nixtamalización tradicional (Félix-Sámano et al., 2025; Sánchez-Magaña et al., 2025), la TF no solo compensa dicho déficit, sino que optimiza el perfil de aminoácidos esenciales —específicamente lisina y triptófano— que son naturalmente limitantes en el maíz.

En un contexto global en el que el acceso a proteínas de alta calidad biológica está restringido por los costos de las fuentes animales, esta tortilla fortificada surge como una opción accesible para combatir deficiencias nutricionales. Además de su densidad proteica, su consumo regular podría ofrecer beneficios a largo plazo a la



salud pública, tales como la mejora de la resistencia y rigidez ósea asociada a las propiedades de la proteína de soya (Hinton et al., 2018).

Contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante de tortillas de maíz azul

La Tabla 2 presenta el contenido de fitoquímicos en las dos variantes de tortillas evaluadas en este estudio. En cuanto a las antocianinas totales, expresadas como mg equivalentes de cianidina-3-glucósido (C3G) por 100 g de muestra en base seca (bs), se observó que la fortificación con 30% de harina de soya texturizada (TF) no generó diferencias significativas respecto a la tortilla tradicional (TT), con valores de 8.19 ± 0.48 y 8.01 ± 0.83 mg C3G/100 g bs, respectivamente.

Tabla 2. Resultados del contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante de tortillas de maíz azul

Parámetro	Tortilla de maíz azul	
	Tradicional (TT)	Fortificada (TF)
Antocianinas Totales ¹	8.01 ± 0.83^a	8.19 ± 0.48^a
Fenólicos ²		
Total	173.99 ± 0.79^b	229.37 ± 9.23^a
Solubles	26.84 ± 1.34^b	39.63 ± 2.39^a
Insolubles	147.15 ± 0.66^b	189.74 ± 7.03^a
ORAC ³		
Total	$8,376.43 \pm 244.14^b$	$10,083.05 \pm 236.2^a$
Soluble	$2,532.06 \pm 176.14^b$	$4,117.28 \pm 84.38^a$
Insoluble	$5,844.4 \pm 414.80^b$	$6,066.54 \pm 140.64^a$
ABTS ³		
Total	$5,746.73 \pm 268.5^b$	$6,861.43 \pm 522.2^a$
Soluble	$1,990.94 \pm 94.9^b$	$2,540.07 \pm 149.2^a$
Insoluble	$3,755.79 \pm 176.4^b$	4321.36 ± 372.9^a

Las medias fueron separadas por columnas aplicando la prueba de t de Student.

Medias con la misma letra son diferentes ($p < 0.05$).

1 mg equivalentes de Cianidina-3-glucósido (EC3G) /100 g en base seca (bs);

2 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g base seca (bs);

3 μ mol equivalentes de Trolox (ET)/100 g base seca

TT= Tortilla tradicional; TF= Tortilla fortificada

Fuente: Elaboración propia

Este hallazgo es relevante desde el punto de vista funcional, ya que las antocianinas son metabolitos secundarios con propiedades antioxidantes ampliamente



reconocidas, además de participar en la modulación del equilibrio inflamatorio (Urias-Lugo et al., 2015; Herrera-Sotero et al., 2017). Numerosos estudios han asociado su consumo con efectos preventivos frente a enfermedades crónicas como ciertos tipos de cáncer, obesidad, diabetes tipo 2, envejecimiento prematuro y patologías cardiovasculares (Gao et al., 2025). En este sentido, resulta favorable que la adición de soya no haya comprometido el contenido de antocianinas en la tortilla fortificada (TF). Cabe destacar que la soya también es fuente de flavonoides, con un aporte estimado de 2.43 mg EQ/100 g (Multescu et al., 2024), lo que contribuye a preservar el perfil antioxidante del producto final.

Estos resultados sugieren que la incorporación de soya texturizada no solo mejora el valor proteico de la tortilla, sino que mantiene su potencial funcional asociado a compuestos bioactivos. Diversos estudios reportan una amplia variación en el contenido de antocianinas en tortillas de maíz azul nixtamalizado (entre 2 y 27.8 mg de C3G/100 g) (Mora-Rochin et al., 2016; Herrera-Sotero et al., 2017; Colín-Chávez et al., 2020; Astorga-Gaxiola et al., 2023, 2025; Sánchez-Magaña et al., 2025). Estos autores coinciden en que las antocianinas —metabolitos secundarios con reconocidas propiedades antioxidantes— sufren una degradación significativa (hasta del 80%) durante la nixtamalización. Esta pérdida se atribuye principalmente a la alta susceptibilidad de estos compuestos fenólicos frente a condiciones inherentes de alta temperatura y pH alcalino durante el proceso tradicional de nixtamalización, al cual es sometido el grano de maíz.

El análisis del contenido de fenólicos totales (suma de las fracciones solubles e insolubles) reveló diferencias significativas entre las muestras, lo cual valida la estrategia de fortificación (Tabla 2). La tortilla tradicional (TI) presentó un valor de 173.99 ± 0.79 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g base seca (bs), mientras que la tortilla fortificada (TF) alcanzó 229.37 ± 9.23 mg EAG/100 g bs. Este aumento del 32% ($p < 0.05$), tras la incorporación de la harina de soya texturizada, confirma a la soya como un potente ingrediente de enriquecimiento. Este incremento se atribuye directamente a la alta concentración de compuestos fenólicos naturales en la soya, la cual se ha reportado con un contenido de 242.06 mg EAG/100 g bs (Multescu et al., 2024). Específicamente, la soya es rica en isoflavonas, las cuales complementan los ácidos fenólicos y las antocianinas predominantes en el maíz azul. Este resultado es consistente con estudios previos que utilizaron leguminosas para enriquecer harinas de maíz nixtamalizado; por ejemplo, la adición de harina de lenteja en tortilla de maíz azul resultó en un incremento comparable del 21.4% en fenoles totales respecto a la versión sin fortificar.



La magnitud de este aumento es crucial, pues implica que la tortilla fortificada no solo posee un mejor perfil proteico, sino que también ofrece un mayor aporte de compuestos bioactivos, fortaleciendo su potencial como alimento funcional para la prevención de enfermedades asociadas al estrés oxidativo. Estos hallazgos refuerzan la eficacia de la fortificación con leguminosas como estrategia para potenciar el contenido de metabolitos bioactivos en productos tradicionales.

El proceso de nixtamalización, caracterizado por condiciones alcalinas ($\text{pH} > 12$), altas temperaturas y prolongados tiempos de reposo, favorece la remoción del pericarpio del grano de maíz, estructura que concentra más del 80% de los compuestos fenólicos. Esta remoción, junto con la lixiviación inducida por el tratamiento térmico-alcalino, ocasiona una disminución significativa ($> 40\%$) en el contenido de fenólicos totales en productos derivados como la tortilla (Mora-Rochin et al., 2010; Santiago-Ramos et al., 2018; Sánchez-Magaña et al., 2025). En este contexto, la fortificación de tortillas con leguminosas, como la soya texturizada, representa una estrategia eficaz para compensar dicha pérdida, al aportar metabolitos secundarios con reconocidas propiedades biológicas. Entre los ácidos fenólicos predominantes en el maíz y sus derivados se encuentran el ferúlico, cafeico y sinápico (Mora-Rochin et al., 2010; Gaxiola-Cuevas et al., 2017), mientras que la soya se distingue por su contenido de isoflavonas, compuestos con actividad antioxidante y capacidad para actuar como fitoestrógenos, asociados a la reducción de síntomas menopáusicos (Alves-Macedo et al., 2023).

En este estudio fueron observados incrementos significativos en las fracciones de fenólicos solubles (47.6%) e insolubles (29%) en la tortilla fortificada (TF) respecto a la tradicional (TT), con valores de 39.63 ± 2.39 y 189.74 ± 7.03 mg EAG/100 g, bs, respectivamente (Tabla 2). Cabe destacar que la fracción insoluble representa más del 84% del contenido total de fenólicos en ambas formulaciones. Esta fracción, aunque no biodisponible en el tracto gastrointestinal superior, alcanza intacta el colon, donde la microbiota intestinal transforma sus estructuras complejas en compuestos de menor peso molecular, favoreciendo su bioaccesibilidad y absorción (Shahidi & Yeo, 2016). Ensayos *in vitro* de fermentación colónica han demostrado que, tras 5 h de incubación, la microbiota humana puede liberar entre 11.74 y 13.4 mg EAG/g bs de compuestos fenólicos ligados en tortillas de maíz azul, los cuales conservan actividad antioxidante (Astorga-Gaxiola et al., 2023, 2025). Estos hallazgos confirman que la adición de soya texturizada no solo enriquece el contenido de fenólicos totales en la tortilla, sino que también potencia sus propiedades nutraceuticas y funcionales.

Los compuestos antioxidantes presentes en alimentos tienen la capacidad de neutralizar especies reactivas de oxígeno (ERO) y radicales libres, contribuyendo a



la prevención de enfermedades degenerativas asociadas al estrés oxidativo. Por ello, evaluar la actividad antioxidante de los compuestos bioactivos es esencial para determinar su calidad funcional y su potencial terapéutico (Roberts & Sindhu, 2009; Multescu et al., 2024).

En esta investigación la capacidad antioxidante de las tortillas fue determinada mediante los métodos químicos ORAC y ABTS, los cuales permiten cuantificar la eficiencia de los extractos en la neutralización de radicales libres (Albarrán-Contreras et al., 2025). Ambas formulaciones mostraron potencial antioxidante relevante; sin embargo, la tortilla fortificada (TF), elaborada con 30% de harina de soya texturizada y 70% de maíz azul nixtamalizado, presentó incrementos significativos ($p < 0.05$) del 20% en ambos métodos: $10,083.05 \pm 236.2$ y $6,861.43 \pm 522.2$ $\mu\text{mol ET}/100$ g, bs, frente a los valores obtenidos en la tortilla tradicional (TT): $8,376.43 \pm 244.14$ y $5,746.73 \pm 268.5$ $\mu\text{mol ET}/100$ g, bs (Tabla 2). El menor potencial antioxidante de la TT se atribuye a la pérdida de la fracción del pericarpio durante el procesamiento, estructura que concentra más del 80% de los compuestos fenólicos y antioxidantes del grano (Mora-Rochin et al., 2010; Astorga-Gaxiola et al., 2025). En contraste, la incorporación de harinas de leguminosas como la soya no solo mejora el perfil proteico, sino que también potencia la actividad antioxidante del producto final. Este efecto puede explicarse por el incremento del 32% en fenólicos totales, así como por la presencia de antocianinas, ácidos fenólicos (especialmente ferúlico) e isoflavonas, todos ellos con propiedades antioxidantes naturales (Gaxiola-Cuevas et al., 2017; Multescu et al., 2024). Estudios previos han reportado incrementos similares en la capacidad antioxidante tras la adición de harinas de leguminosas. Sánchez-Magaña et al. (2025) documentaron aumentos del 82% en tortillas enriquecidas, mientras que Bon-Padilla et al. (2022) y Gámez-Valdez et al. (2021) observaron mejoras significativas al fortificar tortillas de maíz azul con garbanzo y amaranto. En tortillas tradicionales, se han reportado valores de actividad antioxidante en rangos de 10,276 a 6,432 $\mu\text{mol ET}/100$ g, según los métodos ORAC y ABTS (Bon-Padilla et al., 2022).

Finalmente, es relevante destacar que la fracción insoluble de fenólicos representa más del 60% del potencial antioxidante medido por ambos métodos, lo que subraya la importancia del consumo de cereales y leguminosas como fuente de compuestos funcionales. Estos fenólicos, unidos a la pared celular por enlaces éster o éter, o asociados a hemicelulosa y lignina (Chateigner-Boutin et al., 2016), no son biodisponibles en el intestino delgado, pero son metabolizados por la microbiota colónica en compuestos bioactivos con efectos antioxidantes y antiinflamatorios localizados, contribuyendo así a la salud intestinal (Astorga-Gaxiola et al., 2023).



Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio respaldan la viabilidad de incorporar harina de soya texturizada al maíz azul nixtamalizado como estrategia efectiva para elaborar tortillas con propiedades nutricionales y funcionales superiores. Esta formulación permitió incrementar significativamente el contenido de proteína (79%), los compuestos fenólicos totales (32%) y potenciar la actividad antioxidante (20%), preservando la integridad de las antocianinas y otros compuestos bioactivos propios del maíz azul. Estos hallazgos refuerzan la importancia de desarrollar alternativas tecnológicas orientadas a la producción de alimentos funcionales que contribuyan a mejorar la calidad nutricional de la dieta, especialmente en poblaciones con bajo acceso a proteínas de alta calidad y antioxidantes naturales. Ante la escasa literatura sobre la fortificación de maíces pigmentados con soya texturizada, este trabajo establece un precedente para futuros estudios. Se propone como línea de investigación prioritaria el análisis del comportamiento reológico de la masa y la aceptabilidad sensorial, así como la caracterización detallada del perfil de aminoácidos y polifenoles, con el fin de validar el potencial nutracéutico de este producto en modelos biológicos y clínicos.

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

El presente trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT-México), proyecto No. 168279.

Agradecimientos

Colaboración con la RED CITED-INNOPROT (124RT0164)

Referencias

- Abdel-Aal, E. S. M., & Hucl, P. (1999). A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry*, 76(3), 350–354. <http://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.3.350>
- Acevedo-Pacheco, L., & Serna-Saldívar, S. O. (2016). In vivo protein quality of selected cereal-based staple foods enriched with soybean proteins. *Food & Nutrition Research*, 60, 31382. <http://dx.doi.org/10.3402/fnr.v60.31382>
- Albarrán-Contreras, B. A., Coronado-Cáceres, L. J., Mateos-Díaz, J. C., & Castillo-Herrera, G. A. (2025). Compuestos bioactivos en granos de subutilizados



- de café verde como una ruta para su revalorización. *Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad*, 32(2), 81–92. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15851422>
- Alves-Macedo, G., Paiva-Caria, C. R., Menezes-Barbosa, P. P., Rodríguez-Mazine, M., & Gambero, A. (2023). Bioaccessibility evaluation of soymilk isoflavones with biotransformation processing. *Foods*, 12, 3401. <https://doi.org/10.3390/foods12183401>
- Association of Official Analytical Chemists. (2005). *Official Methods of Analysis Methods*. AOAC. <https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis/>
- Astorga-Gaxiola, A. H., Reyes-Moreno, C., Jiménez-Edeza, M., Cuevas-Rodríguez, E. O., & Mora-Rochin, S. (2025). Effect of traditional nixtamalization and extrusion process on bioaccessibility and antioxidant activity of phenolic compounds in blue maize tortillas during *in vitro* fermentation by human colonic microbiota. *Biotechnia*, 27, 1–11. <http://doi.org/10.18633/biotechnia.v27.2520>
- Astorga-Gaxiola, A. H., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J., Jiménez-Edeza, M., Cuevas-Rodríguez, E. O., Castañeda-Ruelas, G. M., & Mora-Rochin, S. (2023). Release of phenolic compounds with antioxidant activity by human colonic microbiota after *in vitro* fermentation of traditional white and blue maize tortillas. *International Food Research Journal*, 30(1), 240–251. <https://doi.org/10.47836/ifrj.30.1.20>
- Bon-Padilla, B. K., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J., Reynoso-Camacho, R., Gómez-Aldapa, C. A., Gómez-Favela, M. A., & Gutiérrez-Dorado, R. (2022). Tortillas made from nixtamalized maize and extruded chickpea flours: A product with improved *in vitro* nutritional and antihypertensive properties. *Cereal Chemistry*, 99, 1154–1165. <https://doi.org/10.1002/cche.10577>
- Bressani, R., Benavides, V., Acevedo, E., & Ortiz, M. A. (1990). Changes in selected nutrient contents and in protein quality of common and quality-protein maize during rural tortilla preparation. *Cereal Chemistry*, 67(6), 515–518. https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1990/Documents/67_515.pdf
- Chateigner-Boutin, A. L., Ordaz-Ortiz, J. J., Alvarado, C., Bouchet, B., Durand, S., Verhertbruggen, Y., Barriere, Y., & Saulnier, L. (2016). Developing pericarp of maize: a model to study arabinoxylan synthesis and feruloylation. *Frontiers Plant Science*, 7, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01476>
- Chuck-Hernández, C., Pérez-Carrillo, E., Soria-Hernández, C., & Serna-Saldívar, S. O. (2015). Functionality and organoleptic properties of maize tortillas enriched with five different soybean proteins. *Cereal Chemistry*, 92, 341–349. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-07-14-0154-R>
- Colín-Chávez, C., Virgen-Ortiz, J. J., Serrano-Rubio, L. E., Martínez-Téllez, M. A., & Astier, M. (2020). Comparison of nutritional properties and bioactive compounds



- between industrial and artisan fresh tortillas from maize landraces. *Current Research in Food Science*, 3, 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.05.004>
- Collins, J. L., & Sánchez, J. F. (1980). Quality parameters of tortillas fortified with soy and cheese. *Journal of Food Science*, 45, 667–679. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1980.tb04127.x>
- Félix-Sámano, A. L., Félix-Medina, J. V., Quintero-Soto, M. F., Díaz-Peña, I., & Gutiérrez-Dorado, R. (2025). Nixtamalization and extrusion processes: effects on physicochemical, nutritional, and nutraceutical properties in the processing of corn into tortilla. *International Journal of Food Science*, 1, 6961009, 1–16. <https://doi.org/10.1155/ijfo/6961009>
- Figueroa-Cárdenas, J. D., Acero-Godínez, M. G., Vasco-Méndez, N. L., Lozano-Guzmán, A., Flores-Acosta, L. M., & González-Hernández, J. (2001). Fortificación y evaluación de tortillas de nixtamal. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 5(3), 293–302. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222001000300013&lng=es&nrm=iso
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization & United Nations University. (2007). *Protein and amino acid requirements in human nutrition : report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation*. World Health Organization. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/43411>
- Gámez-Valdez, L. C., Gutiérrez-Dorado, R., Gómez-Aldapa, C., Perales-Sánchez, J. X. K., Milán-Carrillo, J., Cuevas-Rodríguez, E. O., Mora-Rochín, S., & Reyes-Moreno, C. (2021). Effect of the extruded amaranth flour addition on the nutritional, nutraceutical, and sensory quality of tortillas produced from extruded creole blue maize flour. *Biotechnia*, 23(2), 103–112. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i2.1385>
- Gao, F., Yang, P., Wang, W., Wang, K., Zhao, L., Wang, Y., & Liao, X. (2025). Unveiling the multifaceted roles of anthocyanins: A review of their bioavailability, impacts on gut and system health, and industrial implications. *Current Research in Food Science*, 11, 101137. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101137>
- Gaxiola-Cuevas, N., Mora-Rochín, S., Cuevas-Rodríguez, E. O., León-López, L., Reyes-Moreno, C., Montoya-Rodríguez, A., & Milán-Carrillo, J. (2017). Phenolic acids profiles and cellular antioxidant activity in tortillas produced from Mexican maize landrace processed by nixtamalization and lime extrusion cooking. *Plant Foods for Human Nutrition*, 72, 314–320. <https://doi.org/10.1007/s11130-017-0624-3>
- Herrera-Sotero, M. Y., Cruz-Hernández, C. D., Trujillo-Carretero, C., Rodríguez-Dorantes, M., García-Galindo, H. S., Chávez-Servia, J. L., Oliart-Ros, R. M., &



- Guzmán-Gerónimo, R. I. (2017). Antioxidant and antiproliferative activity of blue corn and tortilla from native maize. *Chemistry Central Journal*, 11, 110. <http://doi:10.1186/s13065-017-0341-x>
- Hinton, P.S., Ortinau, L. C., Dirkes, R. K., Shaw, E. L., Richard, M. W., Zidon, T. Z., Britton, S. L., Koch, L. G., & Vieira-Potter, V. J. (2018). Soy protein improves tibial whole-bone and tissue-level biomechanical properties in ovariectomized and ovary-intact, low-fit female rats. *Bone Reports*, 8, 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.bonr.2018.05.002>
- Kato, T., Mapes, C., Mera, L., Serratos, J. & Bye, R. (2009). Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Liu, Y., Huang, Z. H., Hu, Z. X., Yu, Z., & An, H. Z. (2023). Texture and rehydration properties of texturised soy protein: analysis based on soybean 7S and 11S proteins. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(1), 323–333. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15787>
- Maung, T. T., Gu, B. Y., Kim, M. H., & Ryu, G. H. (2020). Fermentation of texturized vegetable proteins extruded at different moisture contents: effect on physicochemical, structural, and microbial properties. *Food Science and Biotechnology*, 29(7), 897–907. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00737-3>
- Milán-Carrillo, J., Gutiérrez-Dorado, R., Perales-Sánchez, J. K. K., Cuevas-Rodríguez, E. O., Ramírez-Wong, B., & Reyes-Moreno, C. (2006). The optimization of the extrusion process when using maize flour with a modified amino acid profile for making tortillas. *International Journal of Food Science & Technology*, 41(7), 727–736. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00997.x>
- Mora-Rochin, S., Gutiérrez-Urbe, J. A., Serna-Saldívar, S. O., Sánchez-Peña, P., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2010). Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization or extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 502–508. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.08.010>
- Mora-Rochin, S., Gaxiola-Cuevas, N., Gutiérrez-Urbe, J. A., Milán-Carrillo, J., Milán-Noris, E. M., Reyes-Moreno, C., Serna-Saldivar, S.O., & Cuevas-Rodríguez, E. O. (2016). Effect of traditional nixtamalization on anthocyanin content and profile in Mexican blue maize (*Zea mays* L.) landraces. *LWT-Food Science and Technology*, 68, 563–569. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.009>.
- Mora-Rochin, S., Meza-López, G. S., León-López, L., León-Sicarios, C. R., Reyes-Moreno, C., & Sánchez-Magaña, L. M. (2025). Effect of microwave cooking and solid-state fermentation on nutritional antioxidant, and antiparasitic properties of blue maize. *Revista Bio Ciencias*, 12, 1–18. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1700>



- Multescu, M., Culetu, A., & Susman, E. (2024). Screening of the nutritional properties, bioactive components, and antioxidant properties in legumes. *Foods*, 13, 3528. <https://doi.org/10.3390/foods13223528>
- Nguyen, N. T. M., Vu, V. T. T., & Dao, P. N. T. (2023). Formulation and structural properties of textured vegetable proteins balls using polydextrose. *Chemical Engineering Transactions*, 106, 733–738. <http://doi:10.3303/CET23106123>
- Ortega, E. I., Villegas, E., & Vasal, S. K. (1986). A comparative study of protein changes in normal and quality protein maize during tortilla making. *Cereal Chemistry*, 63(5), 446-451. https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1986/Documents/chem63_446.pdf
- Palacios-Pola, G., Perales-Rivera, H., Figueroa-Cárdenas, J. D., & Hernández-Estrada, Z. J. (2021). Changes in the physical, chemical, and sensory properties from three native corn landraces from Chiapas using two nixtamalization times. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 25, 100373. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100373>
- Ramos, D. M. H., Herrera, S. R., Rojas, N. P., Benítez, A. L., Osuna, H. T. G., Del Río, A. J. L., & Rico, A. M. (2024). Contenido de antocianinas y características físicas de granos de 300 accesiones de maíz pigmentado. *Revista Bio Ciencias*, 11, e1578. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1578>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26, 1231–1237. [http://doi:10.1016/s0891-5849\(98\)00315-3](http://doi:10.1016/s0891-5849(98)00315-3).
- Roberts, C. K., & Sindhu, K. K. (2009). Oxidative stress and metabolic syndrome. *Life Sciences*, 84(21–22), 705–712. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2009.02.026>.
- Rojas-Molina, I., Gutiérrez, E., Cortés-Acevedo, M. E., Falcón, A., Bressani, R., Rojas, A., Ibarra, C., Pons-Hernández, J. L., Guzmán-Maldonado, S. H., Cornejo-Villegas, A., & Rodríguez, M. E. (2008). Analysis of quality protein changes in nixtamalized QPM flours as a function of the steeping time. *Cereal Chemistry*, 85, 409-416. <http://dx.doi.org/10.1094/CCEM-85-3-0409>
- Salinas-Moreno, Y., Gálvez-Mariscal, A., Severiano-Pérez, P., Vázquez-Carrillo, G., & Trejo-Téllez, L. L. (2024). Flavor and TASTE attributes and nutritional insights of maize tortillas from landraces of Mexican races. *Heliyon*, 10(7), e28314. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28314>
- Sánchez-Magaña, L. M., Rodríguez-Heráldez, D. A., Mora-Rochin, S., León-López, L., Reyes-Moreno, C., Domínguez-Arispuro, D. M., & Cuevas-Rodríguez, E. O. (2025). Effect of the lentil flour addition on the nutritional content and



- polyphenols of tortillas from blue maize. *Revista Bio Ciencias*, 12, 1–22, e1701. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.nesp.e1701>
- Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas, J. D., Mariscal-Moreno, R. M., Escalante-Aburto, A., Ponce-García, N., & Véles-Medina, J. J. (2018). Physical and chemical changes undergone by pericarp and endosperm during corn nixtamalization. A review. *Journal of Cereal Science*, 81, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.04.003>
- Serna-Saldívar S O, S García Lara, J A Gutiérrez Uribe (2011) Perfil fitoquímico y propiedades nutraceuticas de maíces pigmentados y sus tortillas. En R. E. Preciado Ortiz, S. Montes Hernández (eds), *Amplitud, Mejoramiento, Usos y Riesgos de la Diversidad Genética de Maíz en México* (pp. 75-96). Sociedad Mexicana de Fitogenética AC.
- Shahidi, F. & Yeo, J. (2016). Insoluble-bound phenolics in food. *Molecules*, 21(9), 1216–1235. <https://doi.org/10.3390/molecules21091216>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178. [http://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](http://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Treviño-Mejía, D., Luna-Vital, D. A., Gaytán-Martínez, M., Mendoza, S., & Loarca-Piña, G. (2016). Fortification of commercial nixtamalized maize (*Zea mays* L.) with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) increased the nutritional and nutraceutical content of tortillas without modifying sensory properties. *Journal of Food Quality*, 39, 569–579. <https://doi:10.1111/jfq.12251>
- Tyug-Tan, S., Shin-Tan, S., & Xuan-Tan, C. (2023). Soy protein, bioactive peptides, and isoflavones: a review of their safety and health benefits. *Pharma Nutrition*, 25, 100352. <https://doi.org/10.1016/j.phanu.2023.100352>
- Urias-Lugo, D., Heredia, J., Muy-Rangel, M., Valdez-Torres, J., Serna-Saldívar, S., & Gutiérrez-Urbe, J. (2015). Anthocyanins and phenolic acids of hybrid and native blue maize (*Zea mays* L.) extracts and their antiproliferative activity in mammary (MCF7), liver (HepG2), colon (Caco 2 and HT29) and prostate (PC3) cancer cells. *Plant Food for Human Nutrition*, 70(2), 193–199. <http://doi:10.1007/s11130-015-0479-4>
- Wittmann, G., Silva-Duarte, L., Záchia-Ayud, M. A., & Misturini-Rossi, D. (2024). Reducing washout of proteins from defatted soybean flakes by alkaline extraction: fractioning and characterization. *Sustainability*, 16, 6238. <https://doi.org/10.3390/su16146238>

Desarrollo de alimentos funcionales con probióticos: el papel de las levaduras

Development of functional foods with probiotics: the role of yeasts

Edgar Illescas-Aparicio¹, Montserrat Alcázar-Valle¹, Anne Gschaedler², Dulce Velásquez-Reyes³,
Eugenia Lugo Cervantes^{1*}

¹ Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Camino Arenero 1227, 45019 El Bajío, Zapopan, Jal., México

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

³ Facultad de Química Farmacéutica Biológica, Universidad Veracruzana, Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán. s/n, Col. Zona Universitaria, 91000 Xalapa-Enríquez, Veracruz, México

*Autora de correspondencia: elugo@ciatej.mx

Palabras clave:

probióticos, levaduras, matrices alimentarias, encapsulación, alimentos funcionales.

Keywords:

probiotics, yeast, food matrices, encapsulation, functional foods.

Resumen

El interés por los alimentos funcionales ha crecido significativamente debido a que ofrecen beneficios para la salud que van más allá de su valor nutricional. Dentro de esta categoría, los probióticos han captado la atención tanto de la industria alimentaria como del consumidor. Si bien las bacterias lácticas como *Lactobacillus* y *Bifidobacterium* han sido las más utilizadas, las levaduras probióticas han surgido como una alternativa prometedora. Este artículo de revisión profundiza en el potencial de las levaduras como probióticos en alimentos funcionales, resaltando el uso de especies de *Saccharomyces* y non-*Saccharomyces*. Se exploran criterios clave, como la viabilidad de las especies y la producción de compuestos bioactivos; asimismo, se discute la aplicación de estas levaduras en matrices alimentarias. El objetivo de esta revisión es ampliar el conocimiento sobre la aplicación de las levaduras en la industria de los alimentos funcionales y revalorar su rol como probióticos.

Abstract

Interest in functional foods has grown significantly because they offer health benefits that go beyond their nutritional value. Within this category, probiotics have garnered the attention of both the food industry and consumers. While lactic acid bacteria such as *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* have been the most widely used, probiotic yeasts have emerged as a promising alternative. This review examines the potential of yeasts as probiotics in functional foods, with a focus on the utilization of *Saccharomyces* and non-*Saccharomyces* strains. Key criteria are explored, such as species viability and the production of bioactive compounds, as well as the application of these yeasts in food matrices. The objective of this review is to expand knowledge about the application of yeasts in the functional food industry and to reassess their role as probiotics.

Recibido: 22 de octubre 2025
Revisado: 29 de noviembre 2025
Aceptado: 30 de diciembre 2025
Publicado: 23 de febrero 2026



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 concepto de alimentos funcionales ha ganado relevancia en respuesta a la creciente demanda de los consumidores por productos que promuevan la salud y el bienestar. En este campo los probióticos han sido objeto de intensa investigación. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) los definen como: “microorganismos vivos que, cuando se administran en cantidades adecuadas, confieren un beneficio para la salud del huésped” (Hill et al., 2014).

Tradicionalmente, los probióticos más utilizados han sido las bacterias ácido-lácticas (BAL) de los géneros *Lactobacillus* y *Bifidobacterium*. Sin embargo, las levaduras han emergido como una alternativa viable y efectiva, ofreciendo ventajas como su mayor tamaño celular, que les confiere una resistencia superior al entorno gastrointestinal, y su capacidad para producir compuestos bioactivos beneficiosos (Staniszewski & Kordowska-Wiater, 2021). A pesar de que *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* ha sido la levadura probiótica más estudiada y utilizada en la industria farmacéutica y alimentaria, existe un vasto potencial inexplorado en otras especies de levaduras. Esta revisión busca compilar los principales hallazgos sobre el potencial probiótico de diversas levaduras, con un enfoque particular en las levaduras non-*Saccharomyces* y su aplicación en la formulación de alimentos funcionales.

Levaduras como microorganismos probióticos

Las levaduras han sido parte de la dieta humana por miles de años, utilizadas en la fermentación de pan, cerveza y vino. Sin embargo, no cualquier levadura puede ser considerada como probiótica. Para reconocer a una cepa con potencial probiótico, tiene que demostrar ser segura, resistir a las condiciones gastrointestinales y conferir un beneficio a la salud (Hill et al., 2014).

El potencial probiótico de las levaduras, en comparación de las bacterias, implica que las levaduras son más resistentes a los ácidos gástricos y las sales biliares que muchas bacterias probióticas (Di Cagno et al., 2020). Ciertas levaduras interactúan con las células inmunes en el intestino, modulando la respuesta inmunológica del huésped y algunas levaduras pueden producir compuestos con actividad antibacteriana que inhiben el crecimiento de patógenos intestinales (Arévalo-Villena et al., 2018).

A nivel inmunológico, diversas especies de levaduras interactúan directamente con las células dendríticas y los macrófagos a través de receptores de reconocimiento de patrones, como los receptores tipo Toll (TLR). Esta interacción puede modular la producción de citocinas, promoviendo una respuesta antiinflamatoria mediante la liberación de IL-10 o fortaleciendo la defensa del huésped con la inducción de



IL-12. En cuanto a su actividad antimicrobiana, las levaduras producen compuestos específicos como micotoxinas y metabolitos como el ácido acético y el feniletanol, los cuales han demostrado inhibir el crecimiento de patógenos como *E. coli*, *Salmonella* y *S. aureus* (Arévalo-Villena et al., 2018; Di Cagno et al., 2020; Sen & Mansell, 2020b; Wang et al., 2024).

Especies de levaduras con potencial probiótico

Más allá de la ampliamente estudiada *Saccharomyces boulardii*, se han identificado diversas especies de levaduras con propiedades probióticas prometedoras. En la Tabla 1 se presentan 31 ejemplos de especies de levadura con potencial probiótico encontradas en la literatura, reportando algunas de sus características que hacen alusión a su potencial como probiótico, además del criterio de evaluación de la seguridad del microorganismo Presunción Cualificada de Seguridad (QPS) utilizada por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA).

Tabla 1. Ejemplos de especies de levadura con potencial probiótico

Levadura	Actividad	Presunción Cualificada de Seguridad (QPS)	Referencia
<i>Aureobasidium proteae</i>	Actividad antioxidante Autoagregación Antifúngico Resistencia a condiciones gastrointestinales	NO	(Fernández-Pacheco, García-Béjar, et al., 2021)
<i>Brettanomyces anomalus</i>	Actividad antioxidante Autoagregación Antifúngico Resistencia a condiciones gastrointestinales	NO	(Wang et al., 2024)
<i>Brettanomyces custersianus</i>	Actividad anticancerígena Actividad antidiabética Actividad antioxidante	NO	(Ragavan & Das, 2020)
<i>Candida albicans</i>	Actividad antimicrobiana Reducción del Colesterol Autoagregación	NO	(Alkalbani et al., 2022)
<i>Candida intermedia</i>	Actividad antimicrobiana Autoagregación Producción de gelatinasa	NO	(Piraine et al., 2023)
<i>Candida tropicalis</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Sin factores de virulencia	NO	(Cosme et al., 2022)



<i>Debaryomyces hansenii</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Sin factores de virulencia	SI	(Cosme et al., 2022)
<i>Dekkera bruxellensis</i>	Actividad antioxidante Autoagregación Resistencia a condiciones gastrointestinales	NO	(Wang et al., 2024)
<i>Diutina rugosa</i>	Actividad antioxidante Autoagregación Antifúngico Resistencia a condiciones gastrointestinales	NO	(Fernández-Pacheco, García-Béjar, et al., 2021)
<i>Hanseniaspora guilliermondii</i>	Actividad antioxidante Autoagregación Antifúngico Resistencia a condiciones gastrointestinales	NO	(Fernández-Pacheco, García-Béjar, et al., 2021)
<i>Hanseniaspora opuntiae</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Sin factores de virulencia	NO	(Cosme et al., 2022; Lara-Hidalgo et al., 2019)
<i>Hanseniaspora osmophila</i>	Actividad antioxidante Reducción de Colesterol Resistencia a condiciones gastrointestinales Resistencia antifúngico	NO	(Fernández-Pacheco, Pintado, et al., 2021)
<i>Hanseniaspora uvarum</i>	Actividad antimicrobiana Autoagregación Producción de gelatinasa	SI	(Piraine et al., 2023)
<i>Hanseniaspora valbyensis</i>	Actividad antioxidante Autoagregación Resistencia a condiciones gastrointestinales	NO	(Wang et al., 2024)
<i>Kluyveromyces lactis</i>	Actividad anticancerígena Actividad antidiabética Actividad antioxidante Actividad antimicrobiana	SI	(Fadda et al., 2017; Ragavan & Das, 2020)
<i>Kluyveromyces marxianus</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Sin factores de virulencia	SI	(Cosme et al., 2022; Fadda et al., 2017)
<i>Lachancea thermotolerans</i>	Actividad antioxidante Reducción de Colesterol Resistencia antifúngico	NO	(Fernández-Pacheco, Pintado, et al., 2021)
<i>Lipomyces starkeyi</i>	Actividad anticancerígena Actividad antidiabética Actividad antioxidante	NO	(Ragavan & Das, 2020)



<i>Meyerozyma caribbica</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Sin factores de virulencia	NO	(Cosme et al., 2022)
<i>Pichia guilliermondii</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Sin factores de virulencia	NO	(Cosme et al., 2022)
<i>Pichia kluyveri</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Producción de gelatinasa Reducción del Colesterol Resistencia a condiciones gastrointestinales Sin factores de virulencia Termotolerantes	NO	(Cosme et al., 2022; Vergara Alvarez et al., 2023)
<i>Pichia kudriavzevii</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Resistencia a condiciones gastrointestinales Sin factores de virulencia Termotolerantes Autoagregación	NO	(Alkalbani et al., 2022; Cosme et al., 2022; Di Cagno et al., 2020; Lara-Hidalgo et al., 2019; Vergara Alvarez et al., 2023; Wang et al., 2024)
<i>Rhodospiridium sphaerocarpum</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Sin factores de virulencia	NO	(Cosme et al., 2022)
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Sin factores de virulencia	NO	(Cosme et al., 2022)
<i>Saccharomyces boulardii</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Resistencia a condiciones gastrointestinales Sin factores de virulencia Resistencia a condiciones gastrointestinales	SI	(Arévalo-Villena et al., 2018; Arslan et al., 2015; Cosme et al., 2022)



<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Autoagregación Actividad antimicrobiana Reducción de Colesterol Resistencia a condiciones gastrointestinales Resistencia antifúngico Termotolerantes	SI	(Alkalbani et al., 2022; Arévalo-Villena et al., 2018; Fadda et al., 2017; Fakruddin et al., 2017; Fernández-Pacheco et al., 2018; Fernández-Pacheco, Pintado, et al., 2021; Fernández-Pacheco Rodríguez et al., 2018; Vergara Álvarez et al., 2023; Wang et al., 2024)
<i>Saccharomycopsis fibuligera</i>	Actividad anticancerígena Actividad antidiabética Actividad antioxidante	NO	(Ragavan & Das, 2020a)
<i>Sachizosaccharomyces pombe</i>	Actividad antioxidante Autoagregación Resistencia a condiciones gastrointestinales	SI	(Wang et al., 2024)
<i>Wickerhamomyces anomalus</i>	Actividad antimicrobiana Actividad antioxidante Actividad antioxidante Autoagregación Inmunomodulador Reducción del Colesterol Sin factores de virulencia	SI	(Cosme et al., 2022; Lara-Hidalgo et al., 2019)
<i>Wickerhamomyces subpelliculosus</i>	Resistencia a condiciones gastrointestinales	NO	(Di Cagno et al., 2020)
<i>Yarrowia lipolytica</i>	Actividad anticancerígena Actividad antidiabética Actividad antioxidante Actividad lipídica	SI	(Ragavan & Das, 2020a)

Nota: La Presunción Calificada de Seguridad (QPS) se reporta según el listado actualizado 2024 por EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ).

Fuente: Elaboración propia

Por ejemplo, *Pichia kudriavzevii* ha despertado interés porque varias especies aisladas muestran una alta resistencia a condiciones gástricas simuladas. En particular, Alkalbani et al. (2022) reportaron especies con notable tolerancia a la bilis y capacidad de hidrolizar sales biliares, lo cual sugiere un potencial significativo en aplicaciones probióticas. Por su parte, *Kluyveromyces marxianus* ha sido investigada por su capacidad para reducir los niveles de colesterol, además de presentar una elevada supervivencia bajo condiciones gástricas y una destacada actividad antioxidante (Cosme et al., 2022). Del mismo género *Kluyveromyces*, *K. lactis* es una cepa interesante al contar con la presunción de seguridad, así como por sus potenciales actividades anticancerígenas, antidiabéticas, antioxidantes y antimicrobianas (Fadda et al., 2017; Ragavan & Das, 2020). Finalmente, *Hanseniaspora uvarum* se ha caracterizado por su elevada tasa de autoagregación, un atributo esencial para la adhesión a células



intestinales y la colonización del tracto. Asimismo, esta especie mostró actividad antagonica frente a bacterias patógenas, lo que la convierte en una candidata de interés para su incorporación como probiótico (Tchamani Piame et al., 2022).

De las 31 levaduras reportadas con potencial probiótico, solo nueve cuentan con la presunción cualificada de seguridad por parte de la EFSA, siendo *Debaryomyces hansenii*, *Hanseniaspora uvarum*, *Kluyveromyces lactis*, *Kluyveromyces marxianus*, *Saccharomyces boulardii*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Schizosaccharomyces pombe*, *Wickerhamomyces anomalus* y *Yarrowia lipolytica*, limitando sus posibles aplicaciones al consumirlo en alimentos.

Beneficios para la salud de las levaduras probióticas

Los beneficios para la salud de las levaduras probióticas son diversos y trascienden la simple mejora de la salud gastrointestinal. Se han documentado tres levaduras con potencial antifúngico y 18 levaduras con actividad antimicrobiana que pueden contribuir a restablecer el equilibrio de la microbiota intestinal tras tratamientos con antibióticos, lo que resulta clave en la prevención de la disbiosis intestinal (Sen & Mansell, 2020).

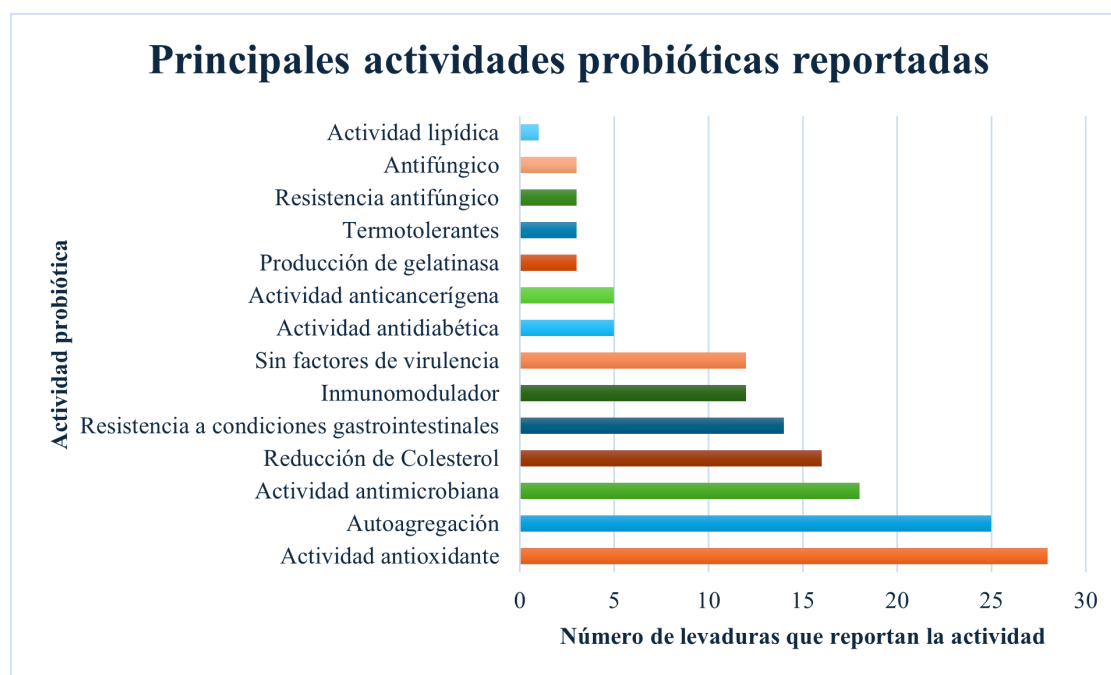


Figura 1. Principales actividades probióticas reportadas en levaduras
Fuente: Elaboración propia

De las principales actividades probióticas reportadas en las levaduras que confieren beneficios a la salud (Figura 1), sobresalen 12 levaduras con actividad potencial



inmunomoduladora que desempeñan un papel importante en la modulación del sistema inmune, fortaleciendo la barrera intestinal y regulando la respuesta inmunológica, lo cual puede tener implicaciones en la prevención de diversas infecciones (Wang et al., 2024), así como la presencia de cinco levaduras han mostrado potencial actividad anticancerígena en estudios *in vitro*, cinco con actividad antidiabética y 28 con actividad antioxidante. Es importante señalar que, aunque abundan los estudios *in vitro* que reportan estas capacidades, se requiere una mayor validación mediante estudios *in vivo* para confirmar estos efectos fisiológicos en humanos.

Otro aspecto relevante es su capacidad para participar en la síntesis de compuestos bioactivos, ya que algunas especies de levaduras probióticas producen vitaminas del complejo B, así como enzimas que favorecen la digestión de nutrientes específicos (Wang et al., 2024).

Aplicación en alimentos funcionales

La incorporación de probióticos en alimentos funcionales representa una tendencia creciente en la industria alimentaria, ofreciendo a los consumidores una manera accesible y natural de obtener sus beneficios sin la necesidad de recurrir a suplementos (Cosme et al., 2022).

La elección de la matriz alimentaria es un factor determinante para el éxito de un alimento funcional probiótico, pues debe garantizar la viabilidad y estabilidad de los microorganismos frente a los diversos factores estresantes a los que se enfrentan. Una matriz adecuada tiene que proteger a los probióticos del estrés asociado al procesamiento, almacenamiento y digestión (Valero-Cases et al., 2020). Tradicionalmente, alimentos como el yogur han sido vehículos excelentes. Sin embargo, se han explorado otras matrices funcionales, como bebidas fermentadas y cereales, ampliando las opciones disponibles para el consumidor.

A pesar del potencial, el proceso de incorporación enfrenta desafíos significativos, principalmente relacionados con mantener la viabilidad de los probióticos durante las etapas de procesamiento y almacenamiento del producto (Cosme et al., 2022). Factores críticos, como el secado de los probióticos (necesario en muchos procesos), requieren especial atención, ya que un proceso demasiado agresivo puede dañar o incluso destruir las células. Para optimizar la supervivencia celular, el secado debe ser lo suficientemente suave como para preservar su integridad (Yan et al., 2022).

Para superar los desafíos de supervivencia y mejorar la eficacia de los probióticos, la microencapsulación emerge como una de las estrategias más efectivas y relevantes en el desarrollo de alimentos funcionales (de Melo Pereira et al., 2018; Sen & Mansell, 2020). Esta técnica consiste en recubrir los microorganismos (ya sean



bacterias o levaduras probióticas) con una capa protectora de materiales biopoliméricos, como el alginato o el quitosano (Yan et al., 2022). El recubrimiento protege a las células de condiciones adversas, como los cambios de temperatura y pH, el calor del procesamiento, el oxígeno y, crucialmente, la acidez del estómago durante el tránsito gastrointestinal. Este método garantiza una mayor tasa de supervivencia y, por ende, su eficacia biológica una vez que llegan al intestino (de Melo Pereira et al., 2018; Sen & Mansell, 2020b; Yan et al., 2022).

Dentro de los productos desarrollados con levaduras probióticas, existen bebidas fermentadas a base de frutas y cereales utilizando *Pichia kluyveri* y *Hanseniaspora uvarum*, logrando productos con un alto perfil antioxidante y viabilidad celular estable (Di Cagno et al., 2020). En la industria de la panificación, la incorporación de *Saccharomyces boulardii* en panes de masa madre ha mostrado ser una estrategia viable para ofrecer productos con beneficios probióticos, siempre que se utilicen técnicas de protección que aseguren la supervivencia del microorganismo tras el proceso de horneado (Arslan et al., 2015).

Se recomienda que el producto contenga los microorganismos en concentraciones cercanas a mil millones de unidades formadoras de colonias por gramo (1×10^9 UFC/g). Este umbral es crucial para que la dosis consumida tenga un impacto positivo en la salud intestinal (Yan et al., 2022).

Desafíos y perspectivas futuras

El prometedor campo de las levaduras como probióticos enfrenta importantes desafíos antes de consolidarse en el mercado de los alimentos funcionales, actualmente dominado por bacterias ácido-lácticas. Uno de los principales retos es la educación del consumidor, cuya percepción del término probiótico suele asociarse exclusivamente con bacterias, lo que limita la aceptación de productos basados en levaduras. A ello se suma la necesidad de fortalecer los marcos regulatorios y los criterios de seguridad microbiológica, ya que, aunque muchas especies muestran un notable potencial probiótico, solo unas pocas cuentan con certificaciones de seguridad para garantizar su uso.

Desde el punto de vista científico y tecnológico, los retos se centran en la validación clínica de sus efectos benéficos y en la optimización de su viabilidad dentro de matrices alimentarias complejas. Si bien abundan los estudios *in vitro* que reportan actividades antioxidantes, inmunomoduladoras o antidiabéticas, aún se requieren investigaciones *in vivo* que confirmen estos resultados y esclarezcan los mecanismos de acción de las levaduras a nivel fisiológico. Por otro lado, garantizar su estabilidad durante el procesamiento, almacenamiento y tránsito gastrointestinal continúa siendo un obstáculo clave para su incorporación exitosa en alimentos.



A futuro, las investigaciones deberán enfocarse en el desarrollo de estrategias de protección celular, como la microencapsulación o la formulación con prebióticos que brinden soporte a los probióticos, así como en la exploración de nuevas especies non-*Saccharomyces* con perfiles metabólicos de interés.

Conclusiones

El uso de levaduras como probióticos representa un campo de investigación vibrante y con un gran potencial para la industria de los alimentos funcionales. La capacidad de estas levaduras para sobrevivir a las condiciones gastrointestinales y su capacidad para producir compuestos beneficiosos las convierten en candidatas ideales para el desarrollo de nuevos productos. En particular, la incorporación de levaduras en matrices alimentarias ofrece una solución prometedora para la protección y entrega efectiva de estos microorganismos.

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

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de financiamiento.

Agradecimientos

Se agradece a la SECIHTI por la beca de posgrado del primer autor (CVU, 1176916).

Referencias

- Alkalbani, N. S., Osaili, T. M., Al-Nabulsi, A. A., Obaid, R. S., Olaimat, A. N., Liu, S. Q., & Ayyash, M. M. (2022). In Vitro Characterization and Identification of Potential Probiotic Yeasts Isolated from Fermented Dairy and Non-Dairy Food Products. *Journal of Fungi*, 8(5),544. <https://doi.org/10.3390/JOF8050544>
- Arévalo-Villena, M., Fernandez-Pacheco, P., Castillo, N., Bevilacqua, A., & Briones Pérez, A. (2018). Probiotic capability in yeasts: Set-up of a screening method. *LWT - Food Science and Technology*, 89(Marzo 2018), 657–665. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.047>
- Arslan, S., Erbas, M., Tontul, I., & Topuz, A. (2015). Microencapsulation of probiotic *Saccharomyces cerevisiae* var: *Boulardii* with different wall materials by spray drying. *LWT - Food Science and Technology*, 63(1), 685–690. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.034>



- Cosme, F., Inês, A., & Vilela, A. (2022). Consumer's acceptability and health consciousness of probiotic and prebiotic of non-dairy products. *Food Research International*, 15, 110842. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110842>
- de Melo Pereira, G. V., de Oliveira Coelho, B., Magalhães Júnior, A. I., Thomaz-Soccol, V., & Soccol, C. R. (2018). How to select a probiotic? A review and update of methods and criteria. *Biotechnology Advances*, 36(8), 2060–2076. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.09.003>
- Di Cagno, R., Filannino, P., Cantatore, V., Polo, A., Celano, G., Martinovic, A., Cавoski, I., & Gobbetti, M. (2020). Design of potential probiotic yeast starters tailored for making a cornelian cherry (*Cornus mas* L.) functional beverage. *International Journal of Food Microbiology*, 323, 108591. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108591>
- EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ), Koutsoumanis, K., Allende, A., Alvarez-Ordóñez, A., Bolton, D., Bover-Cid, S., Chemaly, M., De Cesare, A., Hilbert, F., Lindqvist, R., Nauta, M., Nonno, R., Peixe, L., Ru, G., Simmons, M., Skandamis, P., Suffredini, E., Cocconcelli, P. S., Fernández Escámez, P. S., ... Herman, L. (2024). Update of the list of qualified presumption of safety (QPS) recommended microbiological agents intentionally added to food or feed as notified to EFSA 20: Suitability of taxonomic units notified to EFSA until March 2024. *EFSA Journal*, 22(7), e8882. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8882>
- Fadda, M. E., Mossa, V., Deplano, M., Pisano, M. B., & Cosentino, S. (2017). In vitro screening of *Kluyveromyces* strains isolated from Fiore Sardo cheese for potential use as probiotics. *LWT - Food Science and Technology*, 75(Enero 2017), 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.020>
- Fakruddin, M., Hossain, M. N., & Ahmed, M. M. (2017). Antimicrobial and antioxidant activities of *Saccharomyces cerevisiae* IFST062013, a potential probiotic. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 17(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12906-017-1591-9>
- Fernandez-Pacheco, P., Arévalo-Villena, M., Bevilacqua, A., Corbo, M. R., & Briones Pérez, A. (2018). Probiotic characteristics in *Saccharomyces cerevisiae* strains: Properties for application in food industries. *LWT - Food Science and Technology*, 97(Noviembre 2018), 332–340. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.007>
- Fernández-Pacheco, P., García-Béjar, B., Jiménez-del Castillo, M., Carreño-Domínguez, J., Briones Pérez, A., & Arévalo-Villena, M. (2021). Potential probiotic and food protection role of wild yeasts isolated from pistachio fruits (*Pistacia vera*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(6), 2201–2209. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10839>



- Fernández-Pacheco, P., Pintado, C., Pérez, A. B., & Arévalo-Villena, M. (2021). Potential probiotic strains of saccharomyces and non-saccharomyces: Functional and biotechnological characteristics. *Journal of Fungi*, 7(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/jof7030177>
- Fernandez-Pacheco Rodríguez, P., Arévalo-Villena, M., Zaparoli Rosa, I., & Briones Pérez, A. (2018). Selection of potential non-Sacharomyces probiotic yeasts from food origin by a step-by-step approach. *Food Research International*, 112(Octubre 2018), 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.008>
- Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R., Merenstein, D. J., Pot, B., Morelli, L., Canani, R. B., Flint, H. J., Salminen, S., Calder, P. C., & Sanders, M. E. (2014). Expert consensus document: The international scientific association for probiotics and prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature Reviews Gastroenterology and Hepatology*, 11(8), 506–514. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2014.66>
- Lara-Hidalgo, C. E., Dorantes-Álvarez, L., Hernández-Sánchez, H., Santoyo-Tepole, F., Martínez-Torres, A., Villa-Tanaca, L., & Hernández-Rodríguez, C. (2019). Isolation of Yeasts from Guajillo Pepper (*Capsicum annuum* L.) Fermentation and Study of Some Probiotic Characteristics. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 11(3), 748–764. <https://doi.org/10.1007/s12602-018-9415-x>
- Piraine, R. E. A., Retzlaf, G. M., Gonçalves, V. S., Cunha, R. C., Conrad, N. L., Bochman, M. L., & Leite, F. P. L. (2023). Brewing and probiotic potential activity of wild yeasts *Hanseniaspora uvarum* PIT001, *Pichia kluyveri* LAR001 and *Candida intermedia* ORQ001. *European Food Research and Technology*, 249(1), 133–148. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04139-z>
- Ragavan, M. L., & Das, N. (2020). In Vitro Studies on Therapeutic Potential of Probiotic Yeasts Isolated from Various Sources. *Current Microbiology*, 77(10), 2821–2830. <https://doi.org/10.1007/s00284-020-02100-5>
- Sen, S., & Mansell, T. J. (2020). Yeasts as probiotics: Mechanisms, outcomes, and future potential. *Fungal Genetics and Biology*, 137(Abril 2020), 103333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fgb.2020.103333>
- Staniszewski, A., & Kordowska-Wiater, M. (2021). Probiotic and potentially probiotic yeasts - characteristics and food application. *Foods*, 10(6), 1306. <https://doi.org/10.3390/foods10061306>
- Tchamani Piamé, L., Kaktcham, P. M., Foko Kouam, E. M., Fotso Techeu, U. D., Ngouénam, R. J., & Zambou Ngoufack, F. (2022). Technological characterisation and probiotic traits of yeasts isolated from Sha'a, a Cameroonian maize-based traditional fermented beverage. *Heliyon*, 8(10), 10850. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10850>



- Valero-Cases, E., Cerdá-Bernad, D., Pastor, J.-J., & Frutos, M.-J. (2020). Non-Dairy Fermented Beverages as Potential Carriers to Ensure Probiotics, Prebiotics, and Bioactive Compounds Arrival to the Gut and Their Health Benefits. *Nutrients*, 12(6),1666. <https://doi.org/10.3390/nu12061666>
- Vergara Alvarez, S. C., Leiva Alaniz, M. J., Mestre Furlani, M. V., Vazquez, F., Mancha Agresti, P., Cristina Nally, M., & Paola Maturano, Y. (2023). Bioprospecting of the probiotic potential of yeasts isolated from a wine environment. *Fungal Genetics and Biology*, 164, 103767. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2022.103767>
- Vergara Alvarez, S. C., Leiva Alaniz, M. J., Mestre Furlani, M. V., Vazquez, F., Mancha Agresti, P., Nally, M. C., & Maturano, Y. P. (2023). Bioprospecting of the probiotic potential of yeasts isolated from a wine environment. *Fungal Genetics and Biology*, 164(Enero 2023), 103767. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2022.103767>
- Wang, B., Rutherford-Markwick, K., Liu, N., Zhang, X. X., & Mutukumira, A. N. (2024). Evaluation of the probiotic potential of yeast isolated from kombucha in New Zealand. *Current Research in Food Science*, 8(2024), 100711. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100711>
- Yan, C., Kim, S. R., Ruiz, D. R., & Farmer, J. R. (2022). Microencapsulation for Food Applications: A Review. *ACS Applied Bio Materials*, 5(12), 5497–5512. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00673>



Efecto del tiempo de hidrólisis enzimática en garbanzo (*Cicer arietinum* L.) Desi rojo subutilizado selenizado sobre la liberación de compuestos antioxidantes

Effect of enzymatic hydrolysis time on the release of antioxidant compounds in underutilized selenized red Desi chickpea (*Cicer arietinum* L.)

A. Keila Milán-Noris^{1,2*}, Esmeralda Mascareño-Montoya^{1,2}, Evelia M. Milán-Noris^{1,2}, Eslim S. Sandoval-Sicairos¹, Álvaro Montoya-Rodríguez^{1,2}, Daniela Guardado-Félix¹

¹ Laboratorio de Nutraceuticos (18), Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Blv. de las Américas y Josefa Ortiz de Domínguez, S/N, Culiacán Sinaloa México.

² Posgrado en Ciencias de la Nutrición y Alimentos Medicinales, Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias de la Nutrición y Gastronomía, Av. Cedros S/N, Culiacán, Sinaloa México

*Autora de correspondencia: keilamilan@uas.edu.mx

Resumen

Palabras clave:

germinación, selenio, garbanzo, compuestos bioactivos, hidrólisis enzimática.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la germinación en presencia de selenito de sodio y la hidrólisis enzimática (pepsina + pancreatina) sobre el contenido y la bioaccesibilidad de compuestos nutraceuticos en garbanzo Desi rojo subutilizado. El garbanzo rojo se germinó sin (germinado) y con selenio (2 mg selenito de sodio/100 g; selenizado) por 5 días a 24 °C/80% humedad relativa. Las muestras se hidrolizaron con pepsina 2h + pancreatina 2h y se tomaron alícuotas a diferentes tiempos. Las muestras hidrolizadas y sin hidrolizar se les determinó el perfil de proteínas, proteína soluble (PS), compuestos fenólicos totales (CFT) y potencial antioxidante. El garbanzo selenizado acumuló más del 90 % de selenio. La hidrólisis enzimática de garbanzo germinado y selenizado incrementó (400%) PS, (15 veces) CFT y (2 veces) potencial antioxidante comparado con su contraparte sin hidrolizar. A pesar de que no se encontró un efecto en los nutraceuticos por la biofortificación con selenio. Nuestros resultados muestran que la combinación de la germinación con hidrólisis enzimática genera ingredientes funcionales con potencial para el tratamiento de enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo.

Abstract

Keywords:

germination, selenium, chickpea, bioactive compounds, enzymatic hydrolysis.

This study aimed to determine the effect of germination with selenium and the enzymatic hydrolysis (pepsin + pancreatin) on the content and bioaccessibility of nutraceuticals in underutilized red Desi chickpea. Chickpea seeds were germinated non-selenium (germinated) and selenium (2 mg sodium selenite/100 g; selenized) for 5 days at 24 °C/80% relative humidity. The samples were hydrolyzed with pepsin 2h + pancreatin 2h, then aliquots were collected at different intervals. The hydrolyzed and non-hydrolyzed samples were assayed for protein profile, soluble protein (SP), total phenolic compounds (TPC), and antioxidant potential. Selenized chickpea accumulates up to 90% of Selenium. The enzymatic hydrolysis of germinated and selenized chickpea increased (400%) SP, (15-fold) TPC, and (2-fold) antioxidant potential compared with its counterparts, non-hydrolyzed. Although selenium biofortification did not significantly influence the nutraceutical content, the results herein showed that the combination of germination and enzymatic hydrolysis produces potential functional ingredients for oxidative stress-related diseases.

Recibido: 22 de octubre 2025
Revisado: 24 de noviembre 2025
Aceptado: 30 de diciembre 2025
Publicado: 23 de febrero 2026



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

Las leguminosas son un alimento económico, rico en nutrientes y compuestos bioactivos. El consumo de leguminosas ha sido relacionado con la prevención y disminución de enfermedades crónico-degenerativas relacionadas al estrés oxidativo como cáncer, diabetes mellitus, obesidad, aterosclerosis, por mencionar algunas (Mehany et al., 2025). Dentro de estos granos se encuentra el garbanzo, el cual su consumo ha aumentado en los últimos años, por su contenido de compuestos bioactivos con efecto positivo en la salud o por dietas basadas en proteínas de plantas (Gupta et al., 2017; Aravind K Jukanti et al., 2012).

Por otra parte, el garbanzo se clasifica en dos tipos de granos: Desi (nativo de la India) de testa gruesa con pigmentaciones café, rojo, negro o verde y Kabuli (Nativo del Mediterráneo) de testa delgada con coloración blanco o crema (Chavan et al., 1987; A. K. Jukanti et al., 2012). El garbanzo Desi se puede considerar un grano subutilizado o marginado, ya que América y Europa no se consumen a pesar de su potencial nutricional y nutracéutico. Este grano se emplea principalmente para la alimentación de animales, debido a las dificultades de su procesamiento por el rico contenido de fibra (Raza et al., 2019). Sin embargo, el garbanzo Desi pigmentado contiene un mayor contenido de fitoquímicos y capacidad antioxidante, así como mejor calidad proteica que granos no pigmentados (Garzon-Tiznado et al., 2013; Heiras-Palazuelos et al., 2013; Milán-Noris et al., 2019; Quintero-Soto et al., 2018). Asimismo, el procesamiento de este grano mejora la bioaccesibilidad de los fitoquímicos (Garzon-Tiznado et al., 2013; Milán-Noris et al., 2023).

El selenio es un micronutriente esencial para la nutrición humana y animal, actúa como cofactor en enzimas del sistema antioxidante (glutación peroxidasa y tiorredoxina reductasa). Se recomienda una ingesta diaria de 50 µg, mientras que el consumo de dosis supranutricionales (200 µg/día) se ha asociado con una reducción del riesgo de cáncer (Hu et al., 2008; Sanmartin et al., 2012). La biofortificación de selenio durante el proceso de germinación en leguminosas y vegetales se ha estudiado como estrategia para incrementar el consumo diario de selenio (Guardado-Félix et al., 2017). La germinación de garbanzo Kabuli en presencia de selenito de sodio incrementa significativamente el contenido de selenio e isoflavonas, así como la capacidad antioxidante (Guardado-Félix et al., 2017). El consumo de brotes de garbanzo selenizado ha mostrado efectos quimiopreventivos relacionados con la activación de apoptosis y la disminución de la oxidación de lípidos por acción de glutación peroxidasa (Guardado-Félix et al., 2019). Por otra parte, el selenio se acumula principalmente en la fracción de glutelina del grano, en forma de seleno-metionina (Serrano-Sandoval et al., 2019; Zhang et al., 2012). En consecuencia, la producción



de harinas de granos germinados es un área innovativa de la industria de alimentos para el desarrollo de alimentos saludables (Chauhan et al., 2015; Cornejo et al., 2019). Además, que la biofortificación con selenio le daría un valor agregado.

La hidrólisis enzimática se ha utilizado para la liberación de péptidos bioactivos de diferentes matrices alimentarias o para mejorar propiedades tecnofuncionales de las proteínas vegetales como su solubilidad (Montoya-Rodríguez et al., 2014; Sandoval-Sicairos et al., 2021; Tawalbeh et al., 2025). En hidrolizados de garbanzo Kabuli selenizado se encontró una mayor actividad antioxidante comparada con su control (Serrano-Sandoval et al., 2019). A pesar de lo antes mencionado, no sabemos si la germinación-selenización en garbanzo subutilizado *desi* sea favorable sobre el potencial antioxidante como en el grano Kabuli. Asimismo, no se ha evaluado si este procesamiento favorece la liberación y bioaccesibilidad de compuestos nutraceuticos de garbanzo *Desi*, lo que limita su aprovechamiento para ser utilizado como un ingrediente funcional. Por lo antes mencionado, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la germinación en presencia de selenito de sodio y la hidrólisis enzimática (pepsina + pancreatina) sobre el contenido y la bioaccesibilidad de compuestos nutraceuticos en garbanzo *Desi* rojo subutilizado.

Materiales y Métodos

Materiales

Para este estudio se trabajó con el garbanzo subutilizado rojo *desi* (ICC5383) sembrado en campo experimental del Instituto Nacional de Ciencias Forestales, Agricultura y Ganadería (INIFAP), localizado en Culiacán, Sinaloa, México. Las semillas de garbanzo se cosecharon en abril-mayo, se limpiaron para remover el material extraño, y posteriormente se almacenaron en doble bolsa hermética en un contenedor a -20 °C hasta su uso.

Biofortificación con selenio

Para el proceso de germinación en presencia de selenio se utilizó la metodología previamente descrita (Guardado-Félix et al., 2017; Milán-Noris, et al., 2018). Brevemente, 100 g de semillas de garbanzo se desinfectaron en 200 mL de una solución de hipoclorito de sodio al 0.12% durante 3 min, y después se lavaron 3 veces con agua destilada. A continuación, las semillas se hidrataron en 0.85 volúmenes de agua destilada que contenía 2 mg de selenito de sodio durante 6 h a 25 °C. También se utilizó un grupo control al cual solo se hidrató con agua. Una vez hidratadas, las semillas se transfirieron y dispersaron uniformemente en bandejas de plástico. El proceso de germinación se llevó a cabo en una incubadora sin luz a 24 ± 1 °C con



una humedad relativa (HR) del 80% por 5 días. Las semillas germinadas y selenizadas resultantes se secaron en un deshidratador a 60 °C por 25 horas, molieron y almacenaron a -20 °C hasta su análisis.

Determinación de selenio en grano

El contenido de selenio en los brotes de garbanzo se determinó con base en lo reportado por Guardado-Félix et al. (2017). Los brotes fueron digeridos en solución ácida (HNO₃ al 77%). El contenido de selenio de la digestión ácida se midió usando un espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP/MS) (Thermo Scientific, Waltham, MA, EUA) con un nebulizador concéntrico de vidrio Tipo C (Meinhard, Golden, CO, EE. UU.). La tasa de acumulación de selenio se calculó considerando el selenio total que se absorbió por 100 g de semilla hidratada con 2 mg de Na₂SeO₃.

Simulación de digestión gastrointestinal *in vitro*

La simulación de digestión gastrointestinal *in vitro* se realizó en harinas de garbanzos germinados por 5 días en presencia o ausencia de selenito de sodio. La hidrólisis se realizó acorde a la metodología de Sandoval-Sicairos et al. (2020) con modificaciones. El primer paso fue disolver la muestra en agua (1:20 p/v), se ajustó a 37 °C y pH 2. Después se digirió con pepsina [EC 3.4.23.1, ≥250 unidades/mg; enzima/sustrato, 1:20 (p/p)] durante 2 horas. La digestión gástrica se detuvo incrementando el pH a 7.5 para iniciar una continua digestión intestinal con pancreatina [4x USP; enzima/sustrato, 1:20 (p/p); pH 7.5] a 37 °C durante 2 horas. La digestión se detuvo bajando pH a 4 y calentando a 75 °C durante 20 min. Una vez terminados los digeridos, transitaban a ser centrifugados a 20 000 x g, 4°C durante 20 min. Se tomaron alícuotas durante la digestión a los siguientes tiempos: 30, 60, 90, 120, 180, 210 y 240 min, las cuales se filtraron y almacenaron a -20 °C para el posterior análisis de perfil de proteína, potencial antioxidante, contenido de proteína soluble y compuestos fenólicos.

SDS-PAGE

El ensayo se realizó con base en el método de Sandoval-Sicairos et al. (2021). Primeramente, las muestras fueron diluidas en buffer Laemmli (Bio-Rad) con 5%-β-mercaptoetanol y colocadas a ebullición 5 min previos a cargarlas en el gel de separación. Las bandas de los extractos de proteína de garbanzo se analizaron mediante SDS-PAGE utilizando geles de 15% de poliacrilamida (Bio-Rad). Se utilizó el estándar de peso molecular de proteínas Dual color (Bio-Rad). La etapa de electroforesis se



realizó a 110 voltios durante 120 min en una solución fijadora de 10% de Buffer Tris Glicina y 90% de agua. Las imágenes se obtuvieron utilizando el sistema de imagen “Gel Doc™ XR+ Gel Documentation System” (Bio-Rad).

Determinación de proteína soluble

El contenido total de proteína soluble se determinó mediante el “DC-Protein Assay kit” (Bio-Rad Laboratories, Hércules, CA) para microplacas. Brevemente, 5 μ L de muestra o curva se agregaron en una microplaca (transparente). Posterior a esto se añadieron 25 μ L de reactivo A (solución de tartrato de cobre alcalino) y 200 μ L de reactivo B (reactivo folin diluido) (Bio-Rad 500-0116). Se encuba 15 min y se lee a 690 nm en un espectrofotómetro. Se utilizó una curva estándar de suero bovino. Los resultados fueron expresados como mg de proteína soluble en mL (mg PS/mL).

Determinación del contenido de fenólicos totales (CFT)

El contenido de fenólicos totales se determinó con base en el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu descrito por Singleton et al. (1999). Primero, en cada uno de los microtubos se colocaron 100 μ L de la curva/muestra, después se añadieron 50 μ L del reactivo Folin-Ciocalteu 2N, pasados 5 min, se agregaron 400 μ L de carbonato de sodio 2N, después de 5 min, se agregó 1 mL de agua destilada. Posteriormente, las muestras fueron incubadas a temperatura ambiente durante 90 min y, una vez finalizado el tiempo, se colocaron 200 μ L de cada muestra en una microplaca y se tomó lectura de absorbancia a 740 nm. La cuantificación se llevó a cabo utilizando una curva de ácido gálico y los resultados de CFT se expresaron en mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/ g muestra.

Potencial antioxidante

La capacidad antioxidante de los concentrados proteicos se determinó utilizando el ensayo de capacidad de absorbancia de radicales de oxígeno (ORAC), de acuerdo con el método descrito por Ou et al. (2001). Se utilizó AAPH como generador de peroxilo y Trolox como el estándar antioxidante. Se adicionaron los reactivos en el siguiente orden: 20 μ L del estándar de trolox, 20 μ L de las muestras en PBS, 120 μ L de solución de fluoresceína; y 60 μ L de AAPH. La placa será incubada durante 15 min a 37 °C previo a la adición de AAPH e inmediatamente después de la adición de AAPH, la placa se colocó en el lector de microplaca Synergy HTX (Bio-Tek Instruments, Winooski, VT), con una excitación de 485 nm y una emisión de filtro de 520 nm, y se monitorearon las absorbancias cada 2 min durante 2 h. Los resultados se calcularon basándose en las diferencias de área bajo la curva cayente fluorescente



entre el blanco y las muestras y se expresaron como micromoles de equivalentes de trolox (μmol de ET) /mg PS.

Análisis estadístico

Los datos se reportaron como la media $\pm$ desviación estándar de 3 réplicas, y se analizaron mediante ANOVA de una vía, seguido de la prueba de Tukey para detectar diferencias de acuerdo con el contenido de selenio y el tiempo de hidrólisis. Un valor de $p < 0.05$ se consideró significativo. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante el software JMP del instituto SAS (Cary, NC, EE. UU.).

Resultados y Discusión

Biofortificación con Selenio

En la Tabla 1 se muestran los valores de acumulación de selenio después de cinco días de germinación en presencia de selenito de sodio, donde se observó una acumulación eficiente de selenio superior al 90%. De acuerdo con Lazo-Vélez et al. (2015), la tasa de asimilación del selenio y la conversión a su forma orgánica se ve asociada al tiempo y temperatura de germinación, así como la cantidad y tipo de selenio presente en la solución utilizada. Asimismo, la absorción de selenio podría ser influenciada por las características físicas de las semillas de garbanzo, como la testa (Wood et al., 2011). Sin embargo, el garbanzo Desi estudiado tuvo un porcentaje de acumulación de selenio mayor a los reportados (76%) para el grano Kabuli, a pesar de las diferencias en proporción y por lo tanto grosor de la testa entre los granos Kabuli (3 a 5%) y Desi (9 a 15%) (Guardado-Félix et al., 2017; Milán-Noris et al., 2017). La alta acumulación de selenio sugiere la eficacia del proceso de biofortificación de garbanzo Desi y su potencial como suplementación de este micronutriente. Varios estudios han asociado que el selenio absorbido durante este proceso se convierte principalmente en forma orgánica como seleniometionina que se asocia a las proteínas de reserva haciéndolas más biodisponibles (Serrano-Sandoval et al., 2019; Zhang et al., 2012).

Tabla 1. Contenido de selenio en garbanzo rojo germinado y selenizado

	Contenido de selenio (μg Se/g bs**.)	% selenio acumulado
Germinado	<LOD***	
Selenizado*	9.07 $\pm$ 0.04	97.90 $\pm$ 0.49

*2 mg de selenito de sodio/100 g. ** b.s. base seca. *** LOD. Límite de detección (<0.5 μg Se/g).

Fuente: propia

Efecto del tiempo de hidrólisis enzimática sobre el perfil de proteínas y contenido de proteína soluble en garbanzo germinado-selenizado

En la Figura 1 se observa el perfil de proteínas de los hidrolizados de garbanzo germinado y garbanzo germinado-selenizado, donde se identifican las principales fracciones proteicas: globulinas 11S y 7S, albúminas y glutelinas. A medida que incrementó el tiempo de hidrólisis, se observó una degradación progresiva de las proteínas de alto peso molecular, con la desaparición de bandas entre 55 y 100 kDa desde los primeros 30 min de hidrólisis con pepsina, lo que indica una proteólisis efectiva de las proteínas de reserva. Con el transcurso de la hidrólisis a los 150 min de digestión secuencial (120 min con pepsina y 30 min con pancreatina), las bandas correspondientes a pesos moleculares entre 15 y 37 kDa se hidrolizaron casi por completo, se observan principalmente fragmentos menores a 10 kDa, los cuales podrían ser asociados a la generación de péptidos bioactivos con potencial nutracéutico. Estos comportamientos similares se han reportado en la hidrólisis de proteínas de garbanzo y amaranto germinado, donde la degradación progresiva lleva a acumular péptidos de bajo peso molecular con potencial actividad biológica (Milán-Noris et al.).

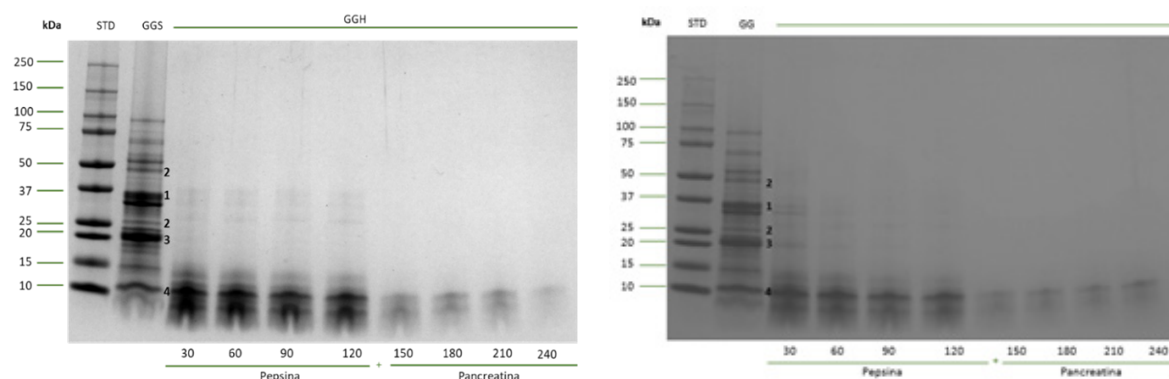


Figura 1. Perfil de proteínas (SDS-PAGE) en hidrolizados de garbanzo Desi rojo germinado y selenizado. A: Garbanzo Desi rojo selenizado; B: Garbanzo Desi rojo germinado; 1: Globulinas 11s; 2: Globulina 7s; 3: Albumina; 4: Glutelina; STD: Estándar de peso molecular de proteínas dual color; GG: Garbanzo germinado; GGH: Garbanzo germinado hidrolizado.

Fuente: propia

Por otra parte, durante la hidrólisis con pepsina (30 a 120 min) se observa mayor resistencia a la hidrólisis en las bandas de 15 a 37 kDa en las muestras germinadas-selenizadas (Figura 1 A) al compararse con las muestras sin selenio (Figura 1 B), lo que sugiere que la incorporación de selenio puede tener un efecto en la estructura o acceso de las proteínas a la acción enzimática. Efectos similares han sido reportados, los cuales podrían atribuirse a la incorporación de selenio como selenometionina a



las proteínas de reserva, cambiando su conformación o interacciones proteína-proteína que retrasen la proteólisis (Calvo et al., 2016; Serrano-Sandoval et al., 2019; L. Wang et al., 2018).

En la Tabla 2 se observa un incremento en el contenido de proteína soluble (PS) ($p < 0.05$) en función del tiempo de hidrólisis. La hidrólisis completa incrementó cinco veces PS tanto en la muestra germinada como en la germinada-selenizada, lo que podría indicar una correcta proteólisis de las proteínas de reserva. Al comparar el hidrolizado al tiempo 240 min, la PS incrementó 400% en ambas muestras al compararla con su correspondiente muestra sin hidrolizar. Comportamientos similares se han observado durante la hidrólisis de amaranto extrudido y germinado (Montoya-Rodríguez et al., 2014; Sandoval-Sicairos et al., 2020). Por otra parte, en estudios previos de garbanzo Desi verde germinado a pesar de reportar con diferentes unidades (mg PS/mL versus mg/g), y procesar diferente SDG, se observaron comportamientos similares, la harina germinada y el digerido insoluble tuvieron un contenido de PS de 250 y 590 mg/g, respectivamente (Milán-Noris et al., 2018).

Tabla 2. Contenido de proteína soluble, compuestos fenólicos totales y potencial antioxidante en hidrolizados de garbanzo rojo germinado y selenizado

Tiempo de hidrólisis (min)	Proteína soluble (mg PS/mL)		Fenólicos totales (mg EAG/g)		Potencial antioxidante ORAC ($\mu\text{mol ET/mg PS}$)	
	Germinado	Selenizado*	Germinado	Selenizado*	Germinado	Selenizado*
Sin Hidrolizar						
0	2.6 $\pm$ 0.0 ^{A_f}	2.6 $\pm$ 0.0 ^{A_e}	0.28 $\pm$ 0.0 ^{B_e}	0.29 $\pm$ 0.0 ^{A_b}	146 $\pm$ 5.7 ^{A_d}	119 $\pm$ 10.0 ^{B_d}
Pepsina						
30	9.7 $\pm$ 0.3 ^{B_e}	11.2 $\pm$ 0.5 ^{A_d}	4.30 $\pm$ 0.0 ^{B_d}	4.52 $\pm$ 0.1 ^{A_a}	357 $\pm$ 35.1 ^{A_b}	254 $\pm$ 13.3 ^{B_c}
60	10.7 $\pm$ 0.7 ^{A_{de}}	11.2 $\pm$ 0.4 ^{A_d}	4.57 $\pm$ 0.1 ^{A_{ab}}	4.59 $\pm$ 0.2 ^{A_a}	334 $\pm$ 13.9 ^{A_b}	279 $\pm$ 13.3 ^{B_c}
90	11.2 $\pm$ 0.5 ^{A_{cd}}	11.8 $\pm$ 0.1 ^{A_{cd}}	4.50 $\pm$ 0.1 ^{A_{abc}}	4.72 $\pm$ 0.3 ^{A_a}	297 $\pm$ 15.3 ^{A_c}	324 $\pm$ 7.2 ^{B_b}
120	11.6 $\pm$ 0.4 ^{A_{bcd}}	12.0 $\pm$ 0.5 ^{A_{cd}}	4.44 $\pm$ 0.1 ^{B_{abcd}}	4.75 $\pm$ 0.2 ^{A_a}	334 $\pm$ 12.8 ^{A_b}	362 $\pm$ 12.4 ^{A_a}
Pepsina + Pancreatina						
150	11.9 $\pm$ 0.4 ^{A_{abcd}}	12.4 $\pm$ 0.8 ^{A_{abcd}}	4.28 $\pm$ 0.1 ^{B_d}	4.74 $\pm$ 0.2 ^{A_a}	381 $\pm$ 2.1 ^{A_{ab}}	313 $\pm$ 0.0 ^{B_b}
180	12.4 $\pm$ 0.2 ^{A_{abc}}	13.3 $\pm$ 0.8 ^{A_{abc}}	4.39 $\pm$ 0.0 ^{B_{bcd}}	4.70 $\pm$ 0.1 ^{A_a}	357 $\pm$ 6.9 ^{A_b}	314 $\pm$ 1.2 ^{B_b}
210	12.7 $\pm$ 0.3 ^{A_{ab}}	13.7 $\pm$ 0.6 ^{A_{ab}}	4.35 $\pm$ 0.1 ^{B_{cd}}	4.61 $\pm$ 0.1 ^{A_a}	423 $\pm$ 1.7 ^{A_a}	364 $\pm$ 6.3 ^{B_a}
240	13.0 $\pm$ 0.4 ^{B_a}	14.1 $\pm$ 0.3 ^{A_a}	4.59 $\pm$ 0.0 ^{A_a}	4.65 $\pm$ 0.2 ^{A_a}	383 $\pm$ 6.6 ^{A_{ab}}	356 $\pm$ 6.1 ^{B_a}

*2 mg de selenito de sodio/100 g. PS: proteína soluble. Los resultados se expresan como medias $\pm$ la desviación estándar. Las medias con letras mayúsculas diferentes por la línea de cada variedad indican una diferencia significativa ($p < 0.05$) por efecto de la selenización. Las medias con letras minúsculas diferentes por columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$) por efecto de la hidrólisis enzimática.

Fuente: propia



Este incremento de PS puede relacionarse con la ruptura de enlaces peptídicos y la generación de péptidos de menor peso molecular, como se puede observar en la Figura 1. Péptidos de bajo peso molecular (< 10 kDa) se les ha encontrado ser más efectivos como antioxidantes o antihipertensivos que los péptidos de mayor peso molecular, quizás por tener una mejor accesibilidad y solubilidad (Daliri et al., 2017). Por otra parte, no se encontró una diferencia entre las muestras germinadas y selenizadas, por lo que se puede inferir que el contenido de selenio no afecta el contenido de proteína soluble. Pudimos observar que la hidrólisis enzimática mejora la solubilidad y bioaccesibilidad de las proteínas de garbanzo Desi mejorando su potencial como ingrediente funcional.

Efecto del tiempo de hidrólisis enzimática sobre el contenido de fenólicos totales y la capacidad antioxidante en garbanzo germinado-selenizado

El contenido de compuestos fenólicos (CFT) en garbanzo germinado y garbanzo selenizado incrementó significativamente debido a la hidrólisis enzimática. Al comparar los diferentes hidrolizados (30 a 240 min) con sus correspondientes muestras sin digerir, el CFT incrementa de 15 a 16 veces, sin efecto significativo atribuible al contenido de selenio. Resultados similares se han encontrado en hidrolizados de amaranto germinado (14-15 veces) al compararse con la muestra sin digerir (Sandoval-Sicairos et al., 2020). En estudios previos de garbanzo Desi verde germinado reportamos 3 mg EAG /g de CFT y de que se procesaron diferente la SDG liberó un alto valor de CFT (9 mg EAG /g) para el digerido insoluble (Milán-Noris et al., 2018). El valor más alto que encontramos en nuestro hidrolizado fue de 4.7 mg EAG/g

Por otra parte, el garbanzo, como otras leguminosas, tiene cantidades importantes de almidón, proteína y fibra, y junto a estos macronutrientes podemos encontrar varios compuestos fenólicos que se encuentran conjugados o ligados a estos, por lo que la conjugación de germinación e hidrólisis enzimática ayuda a hacer más bioaccesibles a los compuestos fenólicos (Rocchetti et al., 2022). Entre mejor la bioaccesibilidad de los compuestos fenólicos, mayor la probabilidad de llegar a tejidos blancos. Los compuestos fenólicos contribuyen a la prevención del estrés oxidativo por inactivación de especies reactivas de oxígeno, intercambio de electrones o hidrógeno, quelación de metales prooxidantes y modulación de los sistemas antioxidantes endógenos ayudando a reducir el daño oxidativo en las células (Rudrapal et al., 2022).

El potencial antioxidante (ORAC) de los hidrolizados de garbanzo germinado y garbanzo germinado-selenizado aumentó ($p < 0.05$) debido al tiempo de hidrólisis. Al comparar los hidrolizados con su correspondiente contraparte sin hidrolizar, el potencial antioxidante aumentó de 2.1 a 2.6 veces. Las muestras variaron de 146 a



423 $\mu\text{mol ET/mg PS}$ en la muestra germinada y de 119 a 364 $\mu\text{mol ET/mg PS}$ en la muestra selenizada. Debido a que normalizamos el potencial antioxidante con base en el contenido de proteína soluble y las diversas metodologías para determinar la capacidad antioxidante son complicadas, comparar numéricamente la capacidad antioxidante con otras referencias es complicado.

Adicionalmente, en un estudio se utilizaron tres metodologías diferentes para determinar el potencial antioxidante, método de blanqueo de β -caroteno, poder de reducción y DPPH, en hidrolizados de garbanzo (sin especificar tipo) por alcalasa y flavorenzima, donde todos los hidrolizados presentaron mejor capacidad antioxidante independiente del método utilizado al compararse con su control sin hidrolizar (Yust et al., 2012). Otros investigadores han observado una mejor actividad antioxidante celular (Caco-2) en hidrolizados de glutelina de garbanzo kabuli selenizado (59%) comparado con su control (39%) (Serrano-Sandoval et al., 2019). Sin embargo, no se observó un efecto por la presencia de selenio durante la germinación en este estudio.

En este estudio observamos que la combinación de procesos como germinación-selenización e hidrólisis enzimática libera tanto compuestos fenólicos como posibles péptidos bioactivos, los cuales contribuyen al potencial biológico de los hidrolizados de garbanzo como previamente lo hemos observado en garbanzo y amaranto (Milán-Noris et al., 2018; Sandoval-Sicairos et al., 2021). El procesamiento del garbanzo de este estudio genera ingredientes funcionales con potencial para el tratamiento de enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo y valoriza el potencial de este grano subutilizado.

Conclusiones

En este estudio se observó que la selenización del garbanzo rojo Desi no incrementó significativamente el contenido de los compuestos bioactivos o potencial antioxidante a pesar de lo reportado para garbanzo Kabuli; sin embargo, la biofortificación con selenio sigue siendo una estrategia útil para contribuir a la ingesta de este micronutriente esencial en la dieta. Además, la combinación del proceso de germinación e hidrólisis enzimática mostró ser una estrategia eficaz para liberación y bioaccesibilidad de compuestos antioxidantes como péptidos y compuestos fenólicos. Estos hallazgos muestran que el garbanzo Desi, a pesar de ser poco utilizado para consumo humano, tiene un alto potencial para el desarrollo de ingredientes alimentarios con beneficios para la salud. Finalmente, este trabajo contribuye a ampliar el conocimiento científico sobre el aprovechamiento del garbanzo Desi, una leguminosa subutilizada para el consumo humano, y respalda su valorización mediante procesos biotecnológicos orientados a la nutrición y la salud.



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

El proyecto se financió con fondos internos del grupo de investigación.

Agradecimientos

Los autores (Keila Milán, Alvaro Montoya, Evelia Milán y Daniela Guardado) de este trabajo son miembros de la red INNOPROT fundada por cyted (Red 124RT0164).

Referencias

- Chauhan, A., Saxena, D. C., & Singh, S. (2015). Total dietary fibre and antioxidant activity of gluten free cookies made from raw and germinated amaranth (*Amaranthus* spp.) flour. *LWT - Food Science and Technology*, 63(2), 939-945. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.115>
- Chavan, J., Kadam, S., Salunkhe, D., & Beuchat, L. R. (1987). Biochemistry and technology of chickpea (*Cicer arietinum* L.) seeds. *Critical Reviews in Food Science Nutrition*, 25(2), 107-158. <https://doi.org/10.1080/10408398709527449>
- Cornejo, F., Novillo, G., Villacrés, E., & Rosell, C. M. (2019). Evaluation of the physicochemical and nutritional changes in two amaranth species (*Amaranthus quitensis* and *Amaranthus caudatus*) after germination. *Food Research International*, 121, 933-939. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.022>
- Daliri, E. B.-M., Oh, D. H., & Lee, B. H. (2017). Bioactive Peptides. *Foods*, 6(5), 32. <https://www.mdpi.com/2304-8158/6/5/32>
- Garzon-Tiznado, J. A., Heiras Palazuelos, M. d. J., Espinoza Moreno, R. J., Cano Campos, M., Delgado Vargas, F., Gutiérrez Dorado, R., Milán Carrillo, J., & Reyes Moreno, C. (2013). Antioxidant and antimutagenic activities of optimized extruded desi chickpea (*Cicer arietinum* L) flours. *Journal of Pharmacy and Nutrition Sciences*, 3(1), 38-47. <https://doi.org/10.6000/1927-5951.2013.03.01.5>
- Guardado-Félix, D., Antunes-Ricardo, M., Rocha-Pizaña, M. R., Martínez-Torres, A.-C., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Saldivar, S. O. S. (2019). Chickpea (*Cicer arietinum* L.) sprouts containing supranutritional levels of selenium decrease tumor growth of colon cancer cells xenografted in immune-suppressed mice. *Journal of Functional Foods*, 53, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.07.003>
- Guardado-Félix, D., Serna-Saldivar, S. O., Cuevas-Rodríguez, E. O., Jacobo-Velázquez, D. A., & Gutiérrez-Urbe, J. A. (2017). Effect of sodium selenite on isoflavo-



- noid contents and antioxidant capacity of chickpea (*Cicer arietinum* L.) sprouts. *Food Chemistry*, 226, 69-74. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.046>
- Gupta, R. K., Gupta, K., Sharma, A., Das, M., Ansari, I. A., & Dwivedi, P. D. (2017). Health Risks and Benefits of Chickpea (*Cicer arietinum*) Consumption. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(1), 6-22. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b02629>
- Heiras-Palazuelos, M. J., Ochoa-Lugo, M. I., Gutiérrez-Dorado, R., López-Valenzuela, J. A., Mora-Rochín, S., Milán-Carrillo, J., Garzón-Tiznado, J. A., & Reyes-Moreno, C. (2013). Technological properties, antioxidant activity and total phenolic and flavonoid content of pigmented chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 64(1), 69-76. <https://doi.org/doi:10.3109/09637486.2012.694854>
- Hu, Y., McIntosh, G.H., Le, R.K., Woodman, R., & Young, G.P. (2008). Suppression of colorectal oncogenesis by selenium-enriched milk proteins: apoptosis and K-ras mutations. *Cancer Research*, 68(12), 4936-44. doi: 10.1158/0008-5472.CAN-07-6042
- Jukanti, A. K., Gaur, P. M., Gowda, C., & Chibbar, R. N. (2012). Nutritional quality and health benefits of chickpea (*Cicer arietinum* L.): a review. *British Journal of Nutrition*, 108(S1), S11-S26. <https://doi.org/10.1017/S0007114512000797>
- Lazo-Vélez, M. A., Chávez-Santoscoy, A., & Serna-Saldivar, S. O. (2015). Selenium-Enriched Breads and Their Benefits in Human Nutrition and Health as Affected by Agronomic, Milling, and Baking Factors. *Cereal Chemistry*, 92(2), 134-144. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-14-0110-RW>
- Mehany, T., Olawoye, B., & Popoola-Akinola, O. (2025). Exploring bioactive compounds and biological functions of underutilized legumes: Advancing the development of ideal plant-based milks (in press). *Journal of Future Foods*. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2025.05.010>
- Milán-Noris, A. K., de la Rosa-Millán, J., Reyes-Moreno, C., & Serna-Saldivar, S. O. (2017). Physicochemical, functional properties, and digestion of isolated starches from pigmented chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Starch - Stärke*, 69(5-6), 1600152. <https://doi.org/10.1002/star.201600152>
- Milán-Noris, A. K., De la Rosa-Millan, J., & Serna-Saldivar, S. O. (2019). Comparative analysis of techno-functional properties, starch digestion and protein quality of pigmented chickpea flours. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(6), 2288-2299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ijfs.14144>
- Milán-Noris, A. K., Gutiérrez-Urbe, J. A., Santacruz, A., Serna-Saldivar, S. O., & Martínez-Villaluenga, C. (2018). Peptides and isoflavones in gastrointestinal



- digests contribute to the anti-inflammatory potential of cooked or germinated desi and kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Food Chemistry*, 268, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.068>
- Milán-Noris, A. K., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Serna-Saldivar, S. O. (2023). Influence of soaking and boiling on flavonoids and saponins of nine desi chickpea cultivars with potential antiproliferative effects. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(4), 3473-3481. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01861-4>
- Montoya-Rodríguez, A., de Mejía, E. G., Dia, V. P., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2014). Extrusion improved the anti-inflammatory effect of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) hydrolysates in LPS-induced human THP-1 macrophage-like and mouse RAW 264.7 macrophages by preventing activation of NF- κ B signaling. *Molecular Nutrition Food Research*, 58(5), 1028-1041. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201300764>
- Ou, B., Hampsch-Woodill, M., & Prior, R. L. (2001). Development and Validation of an Improved Oxygen Radical Absorbance Capacity Assay Using Fluorescein as the Fluorescent Probe. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4619-4626. <https://doi.org/10.1021/jf010586o>
- Quintero-Soto, M. F., Saracho-Peña, A. G., Chavez-Ontiveros, J., Garzon-Tiznado, J. A., Pineda-Hidalgo, K. V., Delgado-Vargas, F., & Lopez-Valenzuela, J. A. (2018). Phenolic profiles and their contribution to the antioxidant activity of selected chickpea genotypes from Mexico and ICRISAT collections. *Plant Foods for Human Nutrition*, 73(2), 122-129. <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0661-6>
- Raza, H., Ameer, K., Zaaboul, F., Sharif, H. R., Ali, B., Shoaib, M., Akhtar, W., & Zhang, L. (2019). Effects of ball-milling on physicochemical, thermal and functional properties of extruded chickpea (*Cicer arietinum* L.) powder. *CyTA-Journal of Food*, 17(1), 563-573. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1617352>
- Rocchetti, G., Gregorio, R. P., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., Oliveira, P. G., Prieto, M. A., Simal-Gandara, J., Mosele, J. I., Motilva, M. J., & Tomas, M. (2022). Functional implications of bound phenolic compounds and phenolics–food interaction: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science Food Safety*, 21(2), 811-842.
- Rudrapal, M., Khairnar, S. J., Khan, J., Dukhyil, A. B., Ansari, M. A., Alomary, M. N., Alshabirmi, F. M., Palai, S., Deb, P. K., & Devi, R. (2022). Dietary Polyphenols and Their Role in Oxidative Stress-Induced Human Diseases: Insights



- Into Protective Effects, Antioxidant Potentials and Mechanism(s) of Action [Review]. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 806470. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.806470>
- Sandoval-Sicairos, E. S., Domínguez-Rodríguez, M., Montoya-Rodríguez, A., Milán-Noris, A. K., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2020). Phytochemical Compounds and Antioxidant Activity Modified by Germination and Hydrolysis in Mexican Amaranth. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75(2), 192-199. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00798-z>
- Sandoval-Sicairos, E. S., Milán-Noris, A. K., Luna-Vital, D. A., Milán-Carrillo, J., & Montoya-Rodríguez, A. (2021). Anti-inflammatory and antioxidant effects of peptides released from germinated amaranth during *in vitro* simulated gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*, 343, 128394. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128394>
- Sanmartín, C., Plano, D., Sharma, A. K., & Palop, J. A. (2012). Selenium Compounds, Apoptosis and Other Types of Cell Death: An Overview for Cancer Therapy. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(8), 9649-9672. <https://www.mdpi.com/1422-0067/13/8/9649>
- Serrano-Sandoval, S. N., Guardado-Félix, D., & Gutiérrez-Urbe, J. A. (2019). Changes in digestibility of proteins from chickpeas (*Cicer arietinum* L.) germinated in presence of selenium and antioxidant capacity of hydrolysates. *Food Chemistry*, 285, 290-295. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.137>
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in enzymology*, 299, 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Tawalbeh, D., Ahmad, F., Alu'datt, M. H., & Sarbon, N. M. (2025). Production improvement of Kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein hydrolysates through ultrasonic pre-treatment approach: Impact on techno-functional properties and antioxidant activity. *Food Chemistry Advances*, 9, 101175. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101175>
- Wood, J. A., Knights, E. J., & Choct, M. (2011). Morphology of Chickpea Seeds (*Cicer arietinum* L.): Comparison of desi and kabuli Types. *International Journal of Plant Sciences*, 172(5), 632-643. <https://doi.org/10.1086/659456>
- Yust, M.delM., Millán-Linares, M.delC., Alcaide-Hidalgo, J. M., Millán, F., & Pedroche, J. (2012). Hypocholesterolaemic and antioxidant activities of chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein hydrolysates. *Journal of the science of food and agriculture*, 92(9), 1994-2001. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5573>



Zhang, L., Li, Q., Yang, X., & Xia, Z. (2012). Effects of sodium selenite and germination on the sprouting of chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and its content of selenium, formononetin and biochanin A in the sprouts. *Biological trace element research*, 146(3), 376-380. <https://doi.org/10.1007/s12011-011-9261-0>



La nueva generación de tortillas: sabor, nutrición y propiedades saludables

The new generation of tortillas: flavor, nutrition, and health benefits

Kendra Baldenebro-Ojeda¹, Fedra-Carolina López-Villa², Jorge Milán-Carrillo^{1,2}, Noé Ontiveros-Apodaca³, Edith-Oliva Cuevas-Rodríguez^{1,2,*}

¹ Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos.

² Programa de Posgrado Integral en Biotecnología, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa. Bv de las Américas y Josefa Ortiz de Domínguez, Ciudad Universitaria, Culiacán, Sinaloa, México, CP 80013.

³ Laboratorio de Investigación Clínica, Departamento de Químico Biológicas y Ciencias Agrícolas, Universidad de Sonora, Navojoa, Sonora, CP 85880.

*Autor de correspondencia: edith.cuevas.r@uas.edu.mx

Palabras clave:

nixtamalización, maíz, tortillas funcionales, leguminosas.

Resumen

La tortilla de maíz es un alimento básico y emblemático de la dieta mexicana por su valor nutricional y relevancia sociocultural. El consumo promedio es de 186 g/día, lo que refleja su importancia en la alimentación nacional. De manera tradicional, se elaboran de maíz nixtamalizado por procesos tradicionales o industriales; sin embargo, presentan deficiencias en aminoácidos esenciales, lo que limita la calidad de su proteína. En respuesta, se han desarrollado tortillas funcionales, incorporando leguminosas u otras fuentes proteicas, con el objetivo de mejorar su perfil nutricional y biofuncional. Estas formulaciones incrementan la biodisponibilidad de nutrientes y el contenido de compuestos bioactivos asociados a beneficios en la salud. Además, tecnologías alternativas como la extrusión se han empleado para mejorar la digestibilidad proteica y reducir factores antinutricionales, preservando características sensoriales y tecnofuncionales. Este artículo revisa avances recientes de la formulación, procesamiento y caracterización de tortillas funcionales, destacando su potencial como alimento saludable, accesible y sostenible.

Abstract

The corn tortilla is a staple and emblematic food in the Mexican diet, for its nutritional value and sociocultural relevance. The average consumption is 186 g/day, reflecting its fundamental role in the national diet. Traditionally, they are made from nixtamalized maize by traditional or industrial processes; however, they are deficient in essential amino acids, which limits the quality of their protein. In response, functional tortillas have been developed, formulated with the incorporation of legumes or other protein sources, with the aim of improving their nutritional and biofunctional profile. These formulations increase the bioavailability of nutrients and bioactive compounds associated with health benefits. Likewise, alternative technologies such as extrusion have been used to improve protein digestibility and reduce antinutritional factors, while preserving sensory and techno-functional characteristics. This article reviews recent advances in the formulation, processing, and characterization of functional tortillas, highlighting their potential as a healthy, accessible, and sustainable food.

Keywords:

nixtamalization, corn, functional tortillas, legumes.

Recibido: 22 de octubre 2025
Revisado: 16 de diciembre 2025
Aceptado: 30 de diciembre 2025
Publicado: 23 de febrero 2026



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

En México, la tortilla de maíz representa uno de los principales alimentos que se llevan a la mesa de la población mexicana, que se elabora de manera tradicional o en forma casera a partir de maíz nixtamalizado o de manera industrial harinas nixtamalizadas, como MASECA® y MINSA®. El maíz es el principal cereal cultivado a nivel mundial, debido a su alto impacto económico al contar con diversas aplicaciones industriales como la producción de alimento para el consumo humano, la producción de proteína animal y la elaboración de productos industriales como materia prima. México cuenta con la mayor diversidad genética de maíz en el mundo con aproximadamente 59 variedades nativas diferentes; su cultivo y domesticación ocurrieron hace aproximadamente 10,000 años, convirtiéndose en la base de la alimentación de los mexicanos. Nuestros antepasados idearon una forma de poder suavizar los granos de maíz para facilitar su molienda, la cual consistía en cocinar los granos de maíz con cenizas de madera y, posteriormente, con cal (CaOH), proceso conocido como nixtamalización, el cual mejora el valor nutricional de grano y su palatabilidad permitiendo la elaboración de masa para dar paso a la producción de diversos alimentos como: tortillas, tamales, bebidas, tostadas, productos de repostería, almidones, galletas, entre otros (Cantillo-Orozco & Bernal Payares, 2020; Galindo-Olguín et al., 2021; Serna-Saldivar, 2015; Utrilla-Coello et al. 2009). Sin embargo, a pesar de ser el maíz un grano básico para la alimentación, es deficiente en aminoácidos como lisina y triptófano. Diversos estudios han mostrado que la combinación de maíz con leguminosas como frijol, garbanzo, lenteja o soya podría mejorar el balance de aminoácidos y con ello la calidad de la proteína de los productos que se elaboren con estas mezclas de harinas (León-López et al., 2019; Hassan et al., 2024; Grajales garcía et al., 2012; Treviño-Mejía et al., 2016; Bon-Padilla et al., 2022).

Las tortillas son el alimento más relevante en México, al considerarse un ícono de la comida mexicana y ser una fuente importante de proteína y calorías. Su consumo por día se estima que es de aproximadamente 217.9 g de tortillas en zonas rurales (equivalentes a 8 tortillas), mientras que en zonas urbanas se consumen aproximadamente 6 tortillas diarias o 155.4 g de tortillas (Espejel-García et al., 2016). Los principales tipos de tortillas producidas en México son de maíz blanco y amarillo; sin embargo, tortillas de maíz azul, morado, rojo y negro también son producidas en menor medida, especialmente en la región centro del país, siendo en estas variedades donde se encuentra la mayor cantidad de compuestos nutraceuticos (antocianinas, ácidos fenólicos, flavonoides, entre otros) (Bello-Pérez et al., 2016; Galindo-Olguín et al., 2021; Serna-Saldivar, 2021). Nutricionalmente, las tortillas son una excelente fuente de carbohidratos, por su alto contenido de almidón y una fuente de minera-



les debido a la adición de calcio (de 1-2% de Ca(OH)_2 , en una proporción 1:3 cal-agua en relación al peso del maíz) en el proceso de nixtamalización; sin embargo, son carentes de vitaminas liposolubles (A, D, E y K) e hidrosolubles (C y B12) y aminoácidos esenciales, debido a esto se han desarrollado tortillas adicionadas con harinas de otros granos (Tabla 1) ya que las tortillas nixtamalizadas son deficientes en aminoácidos esenciales como lisina y triptófano; dichas tortillas fortificadas se denominan comúnmente como tortillas funcionales (Félix-Sámano et al., 2025; Serna-Saldivar, 2015; Chuck-Hernandez & Serna-Saldivar, 2019). Siguiendo esta idea, en los últimos años se ha buscado mejorar la biodisponibilidad de las proteínas de las tortillas utilizando tecnologías alternativas para la producción de las harinas, una de ellas es la extrusión alcalina, la cual es un proceso que se lleva a cabo en condiciones básicas de pH y se caracteriza por el uso de altas temperaturas en corto tiempo capaz de modificar la matriz alimentaria y mejorando cualidades como la digestibilidad de las proteínas al inactivar factores antinutricionales los cuales son responsables de disminuir la digestión o desnaturalizar las proteínas exponiendo grupos funcionales lo que facilita la acción de las enzimas digestivas (Reyes-Moreno et al., 2018; Félix-Sámano et al., 2025). Por ello, la presente revisión tiene como objetivo recopilar la información relevante sobre el efecto de la suplementación con diversos granos y otros ingredientes sobre tortillas funcionales: perfil nutricional, biofuncional, sensorial y tecnofuncional.

Tabla 1. Diversidad de tortillas elaboradas a partir de maíz nixtamalizado por proceso tradicional o métodos alternativos y tortillas funcionales adicionadas con granos u otros ingredientes

Procesamiento del maíz	Harinas de granos o ingredientes adicionados	*% de harinas (maíz: ingrediente)	Referencia
<i>Blanco nixtamalizado (T)</i>	-	100	Rodiles-López et al. (2018)
<i>Azul nixtamalizado (T)</i>	-	100	Sanchez-Magaña et al. (2025)
<i>Blanco nixtamalizado (I)</i>	-	100	León-López et al. (2019)
<i>Azul nixtamalizado (T)</i>	Chía desgrasada extruida	75:25	León-Murillo et al. (2021)
<i>Blanco nixtamalizado (I)</i>	Garbanzo extruido	70:30	Bon-Padilla et al. (2022)
<i>Maíz Azul criollo nixtamalizado (T)</i>	Amaranto extruido	70:30	Gámez-Valdez et al. (2022)
<i>Blanco nixtamalizado (I)</i>	Frijol blanco	75:25	Salazar et al. (2020)
<i>Blanco QPM nixtamalizado</i>	Frijol negro cocido	78:22	Grajales-García et al. (2012)
<i>Maíz de alta calidad proteica</i>	Harina de Soya	75:25	Hassan et al. (2023)
<i>Maíz azul nixtamalizado tradicional</i>	Harina de lenteja extrudida	70:30	Sánchez-Magaña et al. (2025)



<i>Harina de maíz comercial MASECA®</i>	Harina de frijol bayo cocido	80:20	Treviño-Mejía et al. (2016)
<i>Harina de maíz nixtamalizado</i>	Harina de Chapulín (grasshopper <i>Sphenarium purpurascens</i>)	90: 10 94:6 98:2	Contreras-Jiménez et al. (2020)
<i>Harina de maíz commercial</i>	Harina de soya desgrasada	90: 10 75: 25 60:40	Wu et al., 2023

*proporciones de mezclas de harina de maíz o granos y/o ingredientes utilizados para la elaboración de la masa para obtener tortillas funcionales. (T): tradicional, (I): industrial

¿Qué es una tortilla y cuál es la importancia en la población mexicana?

Las tortillas son el alimento más relevante en México, ya que son el ícono de la comida mexicana y una fuente importante de proteína y calorías. Los principales tipos de tortillas producidas en México son de maíz blanco y amarillo; y, en menor medida, son utilizados el maíz azul, morado, rojo y negro, especialmente en la región centro del país (Bello-Pérez et al., 2016; Serna-Saldivar, 2021). El consumo de tortillas en México se estima en 186 g/día, equivalentes a 7 tortillas diarias, denotando la importancia de este alimento para la población mexicana (Espejel-García et al., 2016).

La composición nutricional de las tortillas de maíz blanco destaca por su contenido alto de fibra dietaria insoluble y proteínas, con valores relativamente bajos de grasas y minerales. Por otro lado, las tortillas de maíz azul tienen contenidos significativos de fibra dietaria, proteínas y minerales como el calcio y fitoquímicos como antocianinas, ácidos fenólicos, entre otros, mientras tanto poseen valores bajos de grasa, según lo reportado por Colín-Chávez et al. (2020). Cabe señalar que las tortillas elaboradas a base de maíz (100%) son deficientes en algunos aminoácidos esenciales, ya que se conoce que cereales como el maíz son deficientes en lisina y triptófano, por lo que se han sugerido alternativas como la inclusión o fortificación con otros ingredientes como leguminosas, pseudocereales e insectos con la finalidad de obtener harinas nixtamalizadas que permita obtener tortillas con una mejora de la calidad de la proteína que proporciona este alimento, además de proporcionar una mejora en el balance de aminoácidos y disponibilidad de fibra, vitaminas y minerales (Tabla 2) (León-López et al., 201; Bon-Padilla et al., 2022).



Tabla 2. Principales tendencias nutricionales, funcionales, sensoriales y tecnológicas de tortillas de maíz blanco nixtamalizada comercial, tortilla de maíz azul nixtamalizada comercial y tortillas funcionales

Propiedades		Tortillas		Fuente
	Maíz blanco nixtamalizada	Maíz azul nixtamalizada	Funcionales	
Nutricionales				
Proteínas	Menor contenido ↓	Contenido intermedio ↑	Mayor contenido ↑ ↑	Bon-Padilla et al. (2022); Contreras-Jiménez et al. (2020). Gámez-Valdez et al. (2021); Grajales-García et al. (2012); Hassan et al. (2024); León-López et al. (2019); León-Murillo et al. (2021); Salazar et al. (2020); Sánchez-Magaña et al. (2025); Treviño-Mejía et al. (2016):
Lípidos	Menor contenido ↓	Mayor contenido ↑	Contenido variado ↑ ↓	
Minerales	Contenido comparable ↔	Contenido comparable ↔	Mayor contenido ↑	
Carbohidratos	Contenido comparable ↔	Contenido comparable ↔	Contenido variado ↑ ↓	
Digestibilidad proteínica	Menor ↓	Menor ↓	Mayor ↑	Bon-Padilla et al. (2022); Grajales-García et al. (2012); León-López et al. (2019); León-Murillo et al. (2021); Sánchez-Magaña et al. (2025); Treviño-Mejía et al. (2016).
Funcionales				
Actividad antioxidante	Menor actividad ↓	Actividad Intermedia ↑	Mayor actividad ↑ ↑	Bon-Padilla et al. (2022); León-Murillo et al. (2021); Sánchez-Magaña et al. (2025); Contreras- Jiménez et al; (2020); Gámez-Valdez et al. (2021); Hassan et al. (2024); Salazar et al. (2020).
Actividad antihiperten- siva	Menor actividad ↓	Actividad Intermedia ↑	Mayor actividad ↑ ↑	Bon-Padilla et al. (2022); León- López et al. (2019). León-Mu- rillo et al. (2021); Salazar et al. (2020).
Actividad antidiabética	Actividad comparable ↔	Actividad comparable ↔	Actividad variable ↑ ↓	Bon-Padilla et al. (2022); Gámez-Valdez et al. (2021); León-Murillo et al. (2021); Salazar et al. (2020)
Sensoriales-Tecnológicas				
Aceptabilidad	Buena ↑	Buena ↑	Variable ↔	Bon-Padilla et al. (2022); Grajales-García et al. (2012); Hassan et al. (2024); León-López et al. (2019); León-Murillo et al. (2021); Salazar et al. (2020); Sánchez-Magaña et al. (2025). Treviño-Mejía et al. (2016);
Sabor	Bueno ↑	Bueno ↑	Variable ↑ ↓↔	
Color	Aceptación Similar ↔	Aceptación Similar ↔	Aceptación Similar ↔	
Textura	Buena ↑	Buena ↑	Similar o menor ↔↓	



Hinchabilidad	Bueno ↑	Bueno ↑	Similar o menor ↔↓	Bon-Padilla et al. (2022); Grajales-García et al. (2012); Hassan et al. (2024); León-López et al. (2019); León-Murillo et al. (2021); Salazar et al. (2020); Sánchez-Magaña et al. (2025).
Rolabilidad*	Bueno ↑	Bueno ↑	Similar o menor ↔↓	

↓: Indica disminución de la propiedad; ↑ indica aumento de la propiedad; ↔ indica que no existe diferencia entre las propiedades; ↑ indica un aumento significativo de la propiedad; ↑ ↓ indica que la propiedad puede aumentar o disminuir; ↑ ↓ ↔ indica resultados variables. *Porcentaje de rompimiento de una tortilla después de ser enrollada sobre una varilla, utilizando una escala de 5 puntos (1=0%, 2=25 %, 3=26-50 %, 4=51-75 % 5= 76-100% de rompimiento).

¿Cuáles son los procesos tradicionales, industriales y alternativos para la elaboración de tortillas de maíz?

La nixtamalización, del náhuatl *nixtli* “cal de cenizas” y *tamalli* “masa de maíz cocida”, es un proceso tradicional utilizado para producir tortillas, botanas y harinas de maíz. Este proceso utiliza como ingredientes los granos de maíz maduros, álcali (cal) de grado alimenticio y agua para la formación del nixtamal, este último es molido para la obtención de masa fresca, y posteriormente llevar a cabo la producción de tortillas de mesa. En harinas nixtamalizadas de manera industrial, (MASECA® y MINSA®) se utilizan algunos ingredientes como emulsionantes, acidulantes, gomas, mezclas de enriquecimiento, blanqueadores, entre otros con el objetivo de mejorar la vida útil de las tortillas, color, textura y calidad nutricional (Serna-Saldivar & Chuck-Hernandez, 2019). La nixtamalización tiene entre sus ventajas un aumento en el contenido de minerales como calcio y magnesio y vitaminas como niacina, así mismo, en tortillas elaboradas a partir de maíz azul nixtamalizado aumenta el contenido de antocianinas glicosiladas debido a la pérdida del pericarpio. El proceso confiere a las tortillas un sabor y textura característicos deseables por los consumidores. Sin embargo, presenta la desventaja de utilizar cantidades considerables de agua y energía, así como provocar la generación de efluentes contaminantes conocido como nejayote el cual posee una alta alcalinidad; se estima que se producen alrededor de 14.4 millones de metros cúbicos por día (Félix-Sámano et al., 2025; Kamau et al., 2020); actualmente se buscan alternativas para su utilización en la alimentación de animales como cerdos o para producir cultivos microbianos. La Figura 1 esquematiza los procesos generales de obtención de harinas aptas para elaborar tortillas (proceso de nixtamalización tradicional, proceso de nixtamalización industrial y el procesos alternativo de extrusión alcalina) y las condiciones generales para elaborar las tortillas a partir de las masas frescas de las harinas.

La extrusión de alimentos es una técnica consolidada muy versátil que se define como el proceso de mezclar, homogeneizar y formar materiales alimenticios,



forzándolos a pasar por un dado diseñado especialmente para cada equipo. Este proceso se utiliza para elaborar análogos cárnicos, texturizados de proteínas, botanas, cereales para desayuno, harinas, entre otros. Este proceso térmico, moderno, consiste en una cocción que ocurre a altas temperaturas y tiempos cortos, el cual combina operaciones unitarias en una sola unidad, entre ellas el mezclado, amasado, transporte, calentamiento, cocción y formado, dando como resultado cambios químicos y moleculares en los alimentos (Adekola, 2016; Felix-Sámano et al., 2025). La extrusión alcalina se ha propuesto como un método alternativo para la producción de harinas para la elaboración de tortillas, debido a que presenta diversas bondades como la utilización integral del grano de maíz y la elusión de la formación de efluentes contaminantes que normalmente se producen en la nixtamalización tradicional (nejayote). Este proceso conlleva la combinación de temperatura, estrés mecánico y componentes alcalinos que dan como resultado cambios estructurales e incitan a la interacción entre los distintos componentes de la harina provocando cambios en sus propiedades funcionales (Dominguez et al., 2024). La utilización de este proceso tiene como objetivo producir harina de manera rápida y continua, aumentando la eficiencia de la producción con respecto a la mano de obra, energía y disposición de espacio en la planta. Entre los principales retos de la utilización de la extrusión se encuentra evitar la gelatinización excesiva de los almidones, así como evitar la expansión del extrudido. Estos problemas se pueden resolver al controlar parámetros como el contenido de humedad, el tamaño de partícula de las harinas, el aporte de calor y la velocidad de tornillo (Serna-Saldivar et al., 2021; Enriquez-Castro et al., 2024).

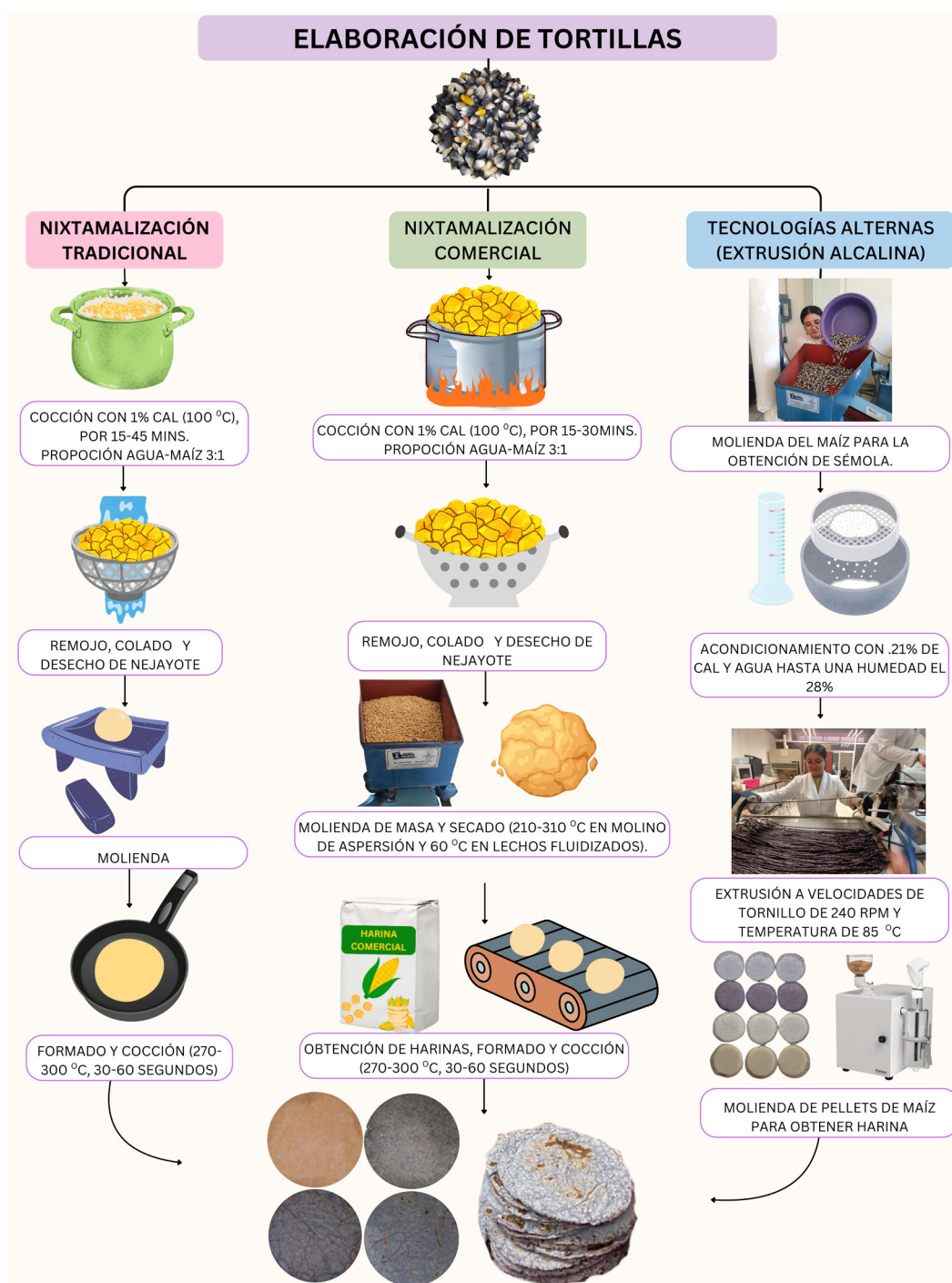


Figura 1. Esquema general de la elaboración de tortillas por los procesos de nixtamalización tradicional, nixtamalización comercial y extrusión alcalina

Por otro lado, una de las ventajas de la extrusión es que ofrece las condiciones para que se lleven a cabo reacciones químicas como la de Maillard, que puede generar pigmentos y compuestos con actividad antioxidante, así mismo, durante el proceso



las fuerzas de corte pueden romper la matriz alimentaria en formas más simples y solubles, inactivando factores antinutricionales y mejorando la accesibilidad de la digestión de proteínas y minerales, y puede mejorar la solubilidad de algunos carbohidratos al modificar la fibra y el almidón, lo que proporciona mejoras en funciones tecnológicas y nutricionales. Sin embargo, este procesamiento tiene la desventaja de disminuir nutrientes termolábiles y el uso de equipos especializados con altos costos de adquisición (Félix-Sámano et al., 2025; Kamau et al., 2020).

De manera general se puede destacar que, tanto la nixtamalización como la extrusión alcalina son procesos térmicos que muestran similitudes como la habilidad de romper la matriz alimentaria dando paso a la liberación de nutrientes, así mismo, ambos procesos pueden inactivar factores antinutricionales mejorando la digestibilidad de las tortillas, y son capaces de transformar carbohidratos complejos a sus formas simples y solubles, lo cual puede mejorar su aprovechamiento al ser consumidos (Kamau et al., 2020).

¿Qué son las tortillas funcionales?

Un alimento funcional se define como aquel alimento que contiene componentes o ingredientes biológicamente activos que ejercen algún efecto benéfico en la salud de los consumidores y que además pueden nutrir al organismo, en una o varias funciones, ocasionando que el individuo pueda mejorar o prevenir riesgos de sufrir alguna enfermedad (Fekete et al., 2025). Investigaciones recientes han propuesto mejorar la calidad nutricional de las tortillas, las cuales se han denominado “tortillas funcionales” (Tabla 2). Las tortillas funcionales son mejoradas nutricionalmente a través del incremento en la calidad de la proteína, con la incorporación de leguminosas como frijol, lentejas, soya, garbanzo, amaranto y otras proteínas alternativas como insectos, con la finalidad de mejorar el perfil de aminoácidos, incrementar el contenido de fibra dietaria soluble, el mejoramiento del perfil de ácidos grasos, así como mejorar la digestibilidad y bioaccesibilidad de nutrientes, conservando las características fisicoquímicas y sensoriales (Gutiérrez et al., 2025).

Alternativas para el mejoramiento nutrimental de tortillas funcionales

Mejora de la digestibilidad proteica de tortillas adicionadas con otros ingredientes

Con la finalidad de mejorar las propiedades nutricionales de alimentos dirigidos principalmente a poblaciones vulnerables en México y atendiendo demandas específicas de consumo por alimentos funcionales como las tortillas, diversas investigaciones han mostrado que la utilización de mezclas de ingredientes como maíz-leguminosa, maíz-insectos y procesos alternativos a la nixtamalización es posible obtener tortillas con pro-



propiedades nutricionales, funcionales y sensoriales agradables al consumidor, además, de potenciar propiedades benéficas en la salud de los consumidores, como la reportadas por Bon-Padilla et al. (2022) quienes evaluaron la incorporación de harina extruida de garbanzo a harinas de maíz nixtamalizadas para elaborar tortillas, encontrando un aumento en el % DPIV de 76.82 a 82.01% ($p < 0.05$). Así mismo, León Murillo et al. (2021) reportaron que las harinas extruidas de maíz azul y una mezcla de maíz azul extruida y chía extruida presentaron valores de %DPIV mayores (77.01 y 84.01%) a la harina de maíz azul nixtamalizada comercial (75.82%). Por otro lado, Gámez-Valdez et al. (2021) evaluaron el impacto en el %DPIV de tortillas funcionales de maíz azul criollo extruido adicionadas con amaranto extruido, reportando que las tortillas elaboradas con harinas extruidas presentaban mayores porcentajes de digestibilidad proteínica *in vitro* (77.21% y 79.39%) que las tortillas de maíz azul elaboradas con harina nixtamalizada comercial (76.86%), los autores atribuyen este comportamiento a que el proceso de extrusión destruye factores antinutricionales y desnaturaliza las proteínas, lo que facilita la acción de las enzimas en la digestión de estos productos.

Las proteínas son macronutrientes esenciales en la dieta de los humanos, ya que nos proporcionan aminoácidos esenciales y son fuentes importantes de nitrógeno. Sin embargo, su utilización biológica depende de la correcta digestión de las proteínas y la proporción de aminoácidos (Santos-Sánchez et al., 2024). La digestibilidad de las tortillas nixtamalizadas depende de factores como el tiempo de cocción del grano de maíz y la cantidad de cal utilizada en el procesamiento, donde concentraciones mayores de cal y cortos tiempos de cocción pueden disminuir la digestibilidad (Escamilla-Urbina et al., 2025). La digestibilidad de las tortillas puede ser mejorada ya sea añadiendo fuentes alternas, así como utilizando tecnologías alternativas en su producción, como la extrusión alcalina. En países en desarrollo como México, la fortificación de alimentos tradicionales como las tortillas representa una manera eficiente y efectiva de mejorar el consumo de nutrientes de la población, otorgándoles la posibilidad de actuar como vehículos de minerales (zinc, hierro), vitaminas (ácido fólico, tiamina, niacina, riboflavina) y proteínas. Bajo este contexto, ha crecido el interés por la fortificación de las tortillas con la finalidad de responder a la deficiencia de aminoácidos como lisina y triptófano, así como a las demandas por los consumidores por otros microelementos, lo cual ocurre en las tortillas elaboradas con 100% de maíz (Serna-Saldivar, 2015).

Mejora de la actividad antioxidante

Las tortillas que se suelen encontrar en el mercado, elaboradas principalmente con maíz nixtamalizado, pueden aportar carbohidratos complejos y algunos compuestos bioactivos; sin embargo, su capacidad antioxidante suele ser limitada. Por ello, la



incorporación de ingredientes ricos en compuestos fenólicos, los cuales se pueden encontrar en granos integrales, como las leguminosas y pseudocereales, puede mejorar significativamente su potencial antioxidante. Los compuestos antioxidantes presentes en este tipo de mezclas actúan neutralizando los radicales libres y especies reactivas de oxígeno, contribuyendo a la prevención del daño celular y al mantenimiento de la salud metabólica. Además, pueden retardar la oxidación de lípidos y pigmentos, prolongando la vida útil del producto (Salinas-Moreno et al., 2017; García-Castro et al., 2022).

La incorporación de harinas procesadas de algunos granos en tortillas funcionales puede ser un vehículo de estos compuestos bioactivos en los consumidores. León-Murillo et al. (2021) elaboraron tortillas de maíz azul con chía y las harinas fueron procesadas por medio de extrusión alcalina. Al compararse con una tortilla de maíz azul comercial, la tortilla funcional mostró un incremento de alrededor del 15% en la actividad antioxidante por medio del método ORAC (Capacidad de Absorción de Radicales de Oxígeno). Sanchez-Magaña et al. (2025) incorporaron harina de lenteja en la elaboración de tortillas de maíz azul nixtamalizado, donde observaron que la adición de harina de lenteja aumentó la actividad antioxidante al compararse con una tortilla de maíz (100%) azul nixtamalizado. En este contexto, el desarrollo de tortillas con capacidad antioxidante mejorada no solo representa una alternativa para diversificar la oferta alimenticia tradicional, sino que también representa una estrategia efectiva para promover una dieta más saludable, alineada con la tendencia hacia el consumo de alimentos con propiedades funcionales y beneficios para la salud.

Actividad antihipertensiva

La mezcla de harinas alternativas combinadas con maíz nixtamalizado puede favorecer la vasodilatación y la inhibición de la enzima convertidora de angiotensina (ECA), uno de los mecanismos principales que contribuyen a la reducción de la presión arterial. Estos efectos se atribuyen a la presencia de compuestos bioactivos, entre los que destacan péptidos y compuestos fenólicos, los cuales se pueden encontrar en diversas fuentes alimentarias. Los péptidos que poseen aminoácidos hidrofóbicos en el extremo C-terminal presentan una elevada afinidad por los sitios activos de la ECA, lo que permite su inhibición. Por otro lado, los compuestos fenólicos pueden inhibir la expresión de la nicotinamida adenina dinucleótido fosfato oxidasa (NADPH oxidasa), reducir la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y modular la síntesis de óxido nítrico (NO). Asimismo, estos compuestos presentan la capacidad de interaccionar con el ion zinc presente en el sitio activo de la ECA,



contribuyendo de manera conjunta a sus efectos antihipertensivos (Yousefian et al., 2019; García-Castro et al., 2022).

León-Lopez et al. (2019) elaboraron tortillas a partir de harina de maíz nixtamalizada comercial adicionada con semillas de chía extruida, y al extraer sus compuestos fenólicos se observó que estos son capaces de mostrar inhibición de la enzima ECA, lo cual se puede traducir en un potencial antihipertensivo al obtenerse un IC₅₀ (concentración media inhibitoria) de 0.67 mg de extracto/mL, mientras que en extractos de compuestos fenólicos de tortillas de maíz nixtamalizada sin adicionar no se mostró inhibición de la actividad de ECA. Con estos resultados, se sugiere que el uso de harina extruida de chía en la elaboración de tortillas de maíz nixtamalizado puede tener un efecto positivo en el estado de salud en personas con hipertensión como agente terapéutico.

Bon-Padilla et al. (2022) demostraron que la adición de harina de garbanzo extruido en la formulación de tortillas de maíz nixtamalizado dio como resultado una mejora en el efecto antihipertensivo, obteniendo un IC₅₀ de 1.93 mg de extracto/mL, inferior al observado en las tortillas sin adicionar (2.29 mg de extracto/mL), atribuyendo este resultado a la presencia de compuestos bioactivos como ácidos fenólicos, flavonoides, taninos y estilbenos, los cuales han sido reportados como compuestos capaces de inhibir la actividad de la ECA. Cabe señalar que cuando se reportan valores de IC₅₀, cuanto menor sea el número, significa una mejor actividad. Gámez-Valdez et al. (2021) incorporaron harina de amaranto extendida en tortillas de maíz azul criollo extruido para evaluar diversas bioactividades como la actividad antihipertensiva, obteniendo un IC₅₀ de 0.37 mg de extracto/mL en la tortilla funcional, inferior al observado en las tortillas sin adicionar que fue de 0.45 mg de extracto/mL. La mejora en el potencial antihipertensivo funcional de la tortilla podría estar relacionada con la presencia de compuestos bioactivos como ácidos fenólicos y flavonoides, los cuales se caracterizan por tener un alto potencial inhibidor de la ECA.

Actividad antidiabética

La prevalencia de diabetes ha aumentado gradualmente en los últimos años, destacando como un problema de salud pública. Una de las estrategias más efectivas para su prevención y control es la modificación de la dieta, enfocándose en el consumo de alimentos de bajo índice glicémico y ricos en fibra dietética. Las tortillas de maíz forman parte esencial de la dieta de la población mexicana, aunque no son muy recomendables para la terapia nutricional en personas con diabetes (Uuh-Narvaez et al., 2023), por lo que en los últimos años se han buscado alternativas en su



formulación para que sean un alimento funcional ideal para consumo de personas propensas a padecer de diabetes, destacando la incorporación de cereales integrales y leguminosas, conocidos por ser excelentes fuentes de fibra y compuestos fenólicos (Vinayagam et al., 2016).

Grajales-García et al. (2012) evaluaron el índice glicémico de tortillas elaboradas a partir de maíz con proteína de calidad y frijol negro. Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que las tortillas enriquecidas con frijol presentaron una menor digestibilidad del almidón, lo que se relaciona con una reducción del índice glicémico en comparación con las tortillas comerciales. En concreto, las tortillas con frijol negro registraron un índice glicémico de 79.76, mientras que las comerciales alcanzaron 97.5. Estos resultados sugieren que incorporar frijol en la elaboración de tortillas no solo mejora su valor nutricional, sino que también puede ayudar a controlar los niveles de glucosa en sangre, ofreciendo una opción más saludable para personas con riesgo o diagnóstico de diabetes. Acevedo-Martínez y González de Mejía (2021) evaluaron la actividad antidiabética de tortillas de maíz azul y maíz blanco adicionadas con distintas proporciones de hidrolizado de garbanzo (5%, 10% y 15%). Los resultados demostraron que, al aumentar la proporción de hidrolizado de garbanzo en las tortillas, el porcentaje de inhibición de la enzima DPP-IV (dipeptidil peptidasa 4, la cual es inhibidor de la DPP-4 y se utiliza como medicamento para tratar la diabetes mellitus tipo 2) aumentaba. En tortillas de maíz azul adicionadas, los porcentajes de inhibición oscilan entre 82 y 95%, y en tortillas de maíz blanco adicionadas se obtuvieron porcentajes de 72%, 82% y 91%. Estos resultados demostraron que la adición de hidrolizado de garbanzo en tortillas favorece esta propiedad funcional, al ser comparables con el porcentaje de inhibición obtenido en las tortillas sin adicionar (26% en tortilla de maíz azul y 11% en tortilla de maíz blanco), lo cual podría ser generado por interacciones entre compuestos fenólicos y altas concentraciones de proteína. Además, se evaluó su actividad después de la digestión, donde se observó que conservaban su funcionalidad hasta un 60% en ambas tortillas.

Propiedades tecnológicas y sensoriales de tortillas adicionadas con otros granos

Uno de los retos de las tortillas funcionales es obtener propiedades sensoriales y tecnológicas comparables a las tortillas nixtamalizadas comunes, debido a esto es fundamental evaluar estas propiedades en las tortillas funcionales con la finalidad de estimar el agrado del producto final, así como su desempeño tecnológicamente. Sensorialmente, los principales factores que se evalúan son: sabor, color, textura y aceptabilidad general. Las evaluaciones sensoriales de las tortillas funcionales son de



suma importancia debido a que la adición de fuentes proteicas alternas no solo debe conferir propiedades mejoradas, sino que debe asegurar la palatabilidad de estos alimentos funcionales por parte de los consumidores (Gámbaro & McSweeney, 2020).

Las principales propiedades utilizadas para evaluar la calidad tecnológica de las tortillas son la rolabilidad y la capacidad de hinchamiento. La rolabilidad es un parámetro de calidad subjetivo que se refiere al porcentaje de rompimiento de una tortilla después de ser enrollada, utilizando una escala de 5 puntos (donde 1=0% de rompimiento y 5= 76-100% de rompimiento), donde los valores deseados son aquellos más cercanos a 1 (Bedolla & Rooney, 1984). Por otro lado, otra prueba subjetiva es el hinchamiento, el cual hace referencia a la capacidad de las tortillas de expandirse al ser cocinadas por 1 minuto; es evaluada con una escala de 3 puntos (donde 1= 0-30% de hinchamiento y 3=70-100% de hinchamiento) donde valores cercanos a 3 denotan tortillas con mayor calidad tecnológica (Milán-Carrillo et al., 2006). La capacidad de hinchamiento de la tortilla es indicativa de su grado de cocción, debido a que al adicionar calor durante la cocción de las tortillas la humedad evaporada queda atrapada dentro de la tortilla provocando su hinchamiento y, por lo tanto, impactando positivamente en sus cualidades sensoriales (Artavia, et al., 2022). Las propiedades sensoriales y tecnofuncionales de tortillas fortificadas con diferentes fuentes proteicas muestran características variadas y específicas de cada ingrediente adicionado, así como el tipo de proceso utilizado para elaborar las tortillas (Tabla 3). Salazar et al. (2020), al evaluar sensorialmente tortillas de maíz nixtamalizado adicionadas con frijol blanco, encontraron que en una proporción 75:25 las tortillas fortificadas presentaban mayores calificaciones en los parámetros de aceptabilidad sensorial, sabor, olor y textura que las tortillas control elaboradas solo de maíz nixtamalizado. Por otro lado, Sánchez Magaña et al. (2025) encontraron que las tortillas de maíz azul nixtamalizado adicionadas con 30% de harina de lenteja presentan propiedades sensoriales y de hinchamiento similares a la tortilla control, pero una rolabilidad menor, lo que podría causar una baja aceptabilidad para elaborar tacos. Así mismo, Contreras Jiménez et al. (2020) evaluaron las propiedades sensoriales de tortillas adicionadas con 2, 6 y 10% de harina de chapulín encontrando que la aceptabilidad depende no solo de la fuente proteica alterna utilizada, sino también de la cantidad adicionada, donde los mejores resultados para obtener tortilla aceptable fueron con la menor cantidad de harina de chapulín.



Tabla 3. Cuadro comparativo del perfil nutricional, propiedades nutraceuticas y propiedades tecnofuncionales y sensoriales de tortillas elaboradas con maíz blanco nixtamalizado, maíz azul nixtamalizado comercial, maíz azul nixtamalizado y tortillas funcionales elaboradas con fuentes proteicas y procesamiento alternos

Formulaciones de tortillas								
Proporciones	Maíz blanco nixtamalizada comercial	Maíz azul nixtamalizada comercial	Maíz azul nixtamalizada	Maíz azul- negra extruida (75:25)	Maíz nixtamalizado- garbanzo extruido (70:30)	Maíz azul-amaranto extruido (70:30)	Maíz nixtamalizado comercial- frijol común (80:20)	Maíz QPM- Frijol negro (70:30)
Perfil nutricional (%) ^a								
Proteína	8.88	9.2	11.53	15.38	13.27	11.69	10.89	12.04
Lípidos	5.3	2.2	4.44	6.01	3.18	6.21	4.13	3.89
Minerales	.	1.39	1.68	2.58	2.37	2.15	1.81	2.587
Fibra								
Soluble	1.37	-	-	3.54	2.28	2.43	-	-
Insoluble	4.7	-	-	18.03	11.13	9.49	-	-
Total	6.07	-	-	21.57	13.4	11.92	.	14.72
Carbohidratos	-	82.01	82.4	-	67.78	-	84.25	-
Propiedades nutraceuticas/ nutrionales								
Actividad antioxidante b								
ORAC	-	3,999.64	3,419.3	18,006	8,031	13,187	-	-
ABTS	5,985	1,118.96	-	-	5,008	-	5.79	12.55
Potencial Antihipertensivo c								
Inhibidor de ACE -	-	-	0.47	1.93	0.37	-	-	-
Potencial antidiabético c								
α-amilasa	-	-	-	20.07	41.12	18.33	-	-
α-glucosidasa	-	-	-	16.25	37.01	15.04	-	-
DPIV d	79.9	-	-	84	82.01	79.39	-	-
Propiedades tecnofuncionales/sensoriales °								
Aceptabilidad	8.5	-	8.6	8.34	8.51	8.01	5	-
Color	-	-	8.84	7.22	8.37	8	6	-
Sabor	-	-	8.52	7.6	8.23	7.88	5	-
Textura	-	-	8.6	7.71	8.59	7.97	6	-
Hinchamiento	3	-	2.8	3	2.87	2.13	1.7	-
Rolabilidad	5	-	1.83	1.08	1.4	1.96	1.38	-
Fuente	León-López et al. (2019)	Astorga-Gaxiola et al. (2022)	Sánchez-Magaña et al. (2025)	León-Murillo et al. (2021)	Bon-Padilla et al. (2022)	Gómez-Valdez et al. (2022)	Treviño-Mejía et al. (2016)	Grajales-García et al. (2012)

^a Reportado base seca; b)μmol equivalente de Trolox /100g; c IC50= Concentración mínima inhibitoria; d DPIV (%): Digestibilidad proteínica *in vitro*. e Escala de preferencia (1= me disgusta extremadamente y 9= me gusta extremadamente)



En este contexto, resulta evidente la importancia de evaluar los parámetros sensoriales y tecnológicos de las tortillas funcionales.

Conclusiones

Las tortillas de maíz son la base de la alimentación de los mexicanos; estas se elaboran mediante el proceso tradicional de nixtamalización o con harinas nixtamalizadas que se producen de manera comercial. Asimismo, un proceso alternativo como la extrusión permite obtener tortillas de maíz nixtamalizado conservando las propiedades nutricionales, funcionales y sensoriales cuando se comparan con las tortillas tradicionales. La incorporación de leguminosas procesadas térmicamente en porcentajes que van desde un 2% hasta un 30% permite obtener tortillas con características nutricionales y sensoriales iguales o mayores que las obtenidas de manera tradicional. Estas tortillas se conocen como tortillas funcionales, ya que, además de nutrir, han mostrado *in vitro* mejoras en propiedades antioxidantes, antidiabéticas e inhibidoras de enzimas que participan en la regulación de la presión arterial.

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

Este proyecto tuvo financiamiento de SECIHTI del proyecto de Ciencia de Frontera No. 263352.

Agradecimientos

Baldenebro-Ojeda Kendra (CVU: 1313420) y López-Villa Fedra-Carolina (CVU: 1312179) agradecen a SECIHTI por la beca otorgada para la formación de estudios de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos y Maestría en Ciencias con Orientación en Biotecnología, de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Así como también agradecer la colaboración con la RED CITED-INNOPROT (124RT0164).

Referencias

Acevedo-Martinez, K. A., & Gonzalez de Mejia, E. (2021). Fortification of maize tortilla with an optimized chickpea hydrolysate and its effect on DPPIV inhibition capacity and physicochemical characteristics. *Foods*, 10(8), 1835. <http://doi.org/10.3390/foods10081835>



- Adekola, K. A. (2016). Engineering review food extrusion technology and its applications. *Journal of Food Science and Engineering*, 6, 149-168. <http://doi.org/10.17265/2159-5828/2016.03.005>
- Artavia, G., Arias-Álvarez, C., Cortés-Herrera, C., & Granados-Chinchilla, F. (2022). Physicochemical and sensory assessment of partial corn substitutions with carotenoid-containing non-traditional flours during tortilla preparation. *Cogent Food & Agriculture*, 8(1), 2122273. <http://doi.org/10.1080/23311932.2022.2122273>
- Bedolla, S., & Rooney, L. W. (1984). Characteristics of U.S. and Mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation. *Cereal Foods World*, 29(11), 732-735. <http://europepmc.org/abstract/AGR/IND85022082>
- Blanco-Vega, D.D., Reyes-López, A., Vargas-Neri, J.L., & Osnaya-Valencia, F.I. (2024). Efectos de las intervenciones dirigidas por farmacéuticos en pacientes adultos con diabetes mellitus tipo 2 en México: Una revisión sistemática. *Farmacia*, 12(5), 148. <https://doi.org/10.3390/pharmacy12050148>
- Bon-Padilla, B. K., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J., Reynoso-Camacho, R., Gómez-Aldapa, C. A., Gómez-Favela, M. A., & Gutiérrez-Dorado, R. (2022). Tortillas made from nixtamalized maize and extruded chickpea flours: a product with improved in vitro nutritional and antihypertensive properties. *Cereal Chemistry*, 99(5), 1154-1165. <https://doi.org/10.1002/cche.10577>
- Contreras Jiménez, B., Oseguera Toledo, M. E., García Mier, L., Martínez Bravo, R., González Gutiérrez, C. A., Curiel Ayala, F., & Rodríguez-García, M. E. (2020). Physicochemical study of nixtamalized corn masa and tortillas fortified with “chapulin” (grasshopper, *Sphenarium purpurascens*) flour. *CyTA-Journal of Food*, 18(1), 527-534. <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1794980>
- Chuck Hernández, C. E., & Serna-Saldivar, S. O. (2019). Chapter 25 - Soybean-Fortified Nixtamalized Corn Tortillas and Related Products. En V. R. Preedy & R. R. Watson (eds.), *Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention* (Second Edition) (pp. 319-332): Academic Press. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814639-2.00025-3>
- Dominguez, N. E., Gimenez, M. A., Segundo, C. N., Gremaqui, I. d. l. A., Lobo, M. O., & Samman, N. C. (2024). Effect of Alkaline Extrusion Temperature on Rheological Properties of Andean Corn Dough. *Biology and Life Sciences Forum*, 37(1), 19. doi: <https://doi.org/10.3390/blsf2024037019>
- Enriquez-Castro, C. M., Morales-Sánchez, E., & Contreras Jiménez, B. L. (2024). Innovation in Nixtamalization by Extrusion Using the Wet Process. En T. Tse (ed.), *Exploring the World of Cereal Crops*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.1004159



- Escamilla-Urbina, I., Totosaús-Sánchez, A., Rodríguez-Huezo, M. E., Vernon-Carter, E. J., & Álvarez-Ramírez, J. (2025). Effect of calcium hydroxide and nixtamalization time on the in vitro starch and protein digestibility of traditional maize tortillas. *Plant Foods for Human Nutrition*, 80(1), 61. <http://doi.org/10.1007/s11130-024-01245-z>
- Espejel-García, M. V., Mora-Flores, J. A., García-Salazar, J. A., Pérez-Elizalde, S., & García-Mata, R. (2016). Caracterización del consumidor de tortilla en el Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 13(3), 371-384. <https://www.redalyc.org/pdf/3605/360547924002.pdf>
- Fekete, M., Lehoczki, A., Kryczyk-Poprawa, A., Zábó, V., Varga, J. T., Bálint, M., Fazekas-Pongor, V., Csípő, T., Rzaşa-Duran, E., & Varga, P. (2025). Functional Foods in Modern Nutrition Science: Mechanisms, Evidence, and Public Health Implications. *Nutrients*, 17(13), 2153. <https://doi.org/10.3390/nu17132153>
- Félix-Sámano, A., Félix-Medina, J., Quintero-Soto, M. F., Díaz-Peña, I., Gutiérrez Dorado, R. (2025). Nixtamalization and extrusion processes: effects on physicochemical, nutritional, and nutraceutical properties in the processing of corn into tortilla. *International Journal of Food Science*, 2025(1), 6961009. <https://doi.org/10.1155/ijfo/6961009>
- Gámez-Valdez, L. C., Gutiérrez-Dorado, R., Gómez-Aldapa, C. A., Perales-Sánchez, J. X. K., Milán-Carrillo, J., Cuevas-Rodríguez, E. O., Reyes-Moreno, C. (2021). Effect of the extruded amaranth flour addition on the nutritional, nutraceutical and sensory quality of tortillas produced from extruded creole blue maize flour. *Biotechnia*, 23(2), 103-112. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i2.1385>
- Galindo-Olgún, C. N., Cruz-Cansino, N. d. S., Ramírez-Moreno, E., Ariza-Ortega, J. A., Camacho-Bernal, G. I., & Cervantes-Elizarrarás, A. (2021). El maíz y la nixtamalización: modificación de sus componentes, técnicas de proceso y enriquecimiento de tortilla. *Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, 10(19), 205-213. <http://doi.org/10.29057/icsa.v10i19.7236>
- Gaxiola, A. H. A., Moreno, C. R., Edeza, M. J., Rodríguez, E. O. C., & Rochín, S. M. (2025). Efecto del proceso de nixtamalización tradicional y extrusión sobre la bioaccesibilidad y actividad antioxidante de compuestos fenólicos de tortillas de maíz azul durante la fermentación in vitro por la microbiota colónica humana. *Biotechnia*, 27, 1-11. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v27.2520>
- Gámbaro, A., & McSweeney, M. B. (2020). Chapter Eight - Sensory methods applied to the development of probiotic and prebiotic foods. En A. G. da Cruz, E. S. Prudencio, E. A. Esmerino, & M. C. da Silva (eds.), *Advances in Food and Nutri-*



- tion Research* (Vol. 94, pp. 295-337). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2020.06.006>
- García-Castro, A., Roman-Gutiérrez, A. D., Guzmán-Ortiz, F. A., Castañeda-Ovando, A., & Cariño-Cortés, R. (2022). Compuestos bioactivos presentes en alimentos con actividad antihipertensiva y su efecto en COVID-19. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 9(18), 1–6. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i18.8098>
- Grajales-García, E. M., Osorio-Díaz, P., Goñi, I., Hervert-Hernández, D., Guzmán-Maldonado, S. H., & Bello-Pérez, L. A. (2012). Chemical composition, starch digestibility and antioxidant capacity of tortilla made with a blend of quality protein maize and black bean. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(1), 286-301. <https://doi.org/10.3390/ijms13010286>.
- Gutiérrez, E., López-Martínez, L., Tirado-Gallegos, J., Buenrostro Figueroa, J., Galindo, H., & Jiménez, R. (2025). Fortified Maize Tortilla: from the traditional Mesoamerican diet to functional food Tortilla Fortificada: de la dieta tradicional mesoamericana a la alimentación funcional. *Biotechnia*, 27, e2269. [doi:10.18633/biotechnia.v27.2269](https://doi.org/10.18633/biotechnia.v27.2269)
- Hassan, S. M., Forsido, S. F., Tola, Y. B., & Bikila, A. M. (2024). Physicochemical, nutritional, and sensory properties of tortillas prepared from nixtamalized quality protein maize enriched with soybean. *Applied Food Research*, 4(1), 100383. [doi:https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100383](https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100383)
- Hernández-Martínez, V., Salinas-Moreno, Y., Ramírez-Díaz, J. L., Vázquez-Carrillo, G., Domínguez-López, A., & Ramírez-Romero, A. G. (2016). Color, phenolic composition and antioxidant activity of blue tortillas from Mexican maize races. *CyTA - Journal of Food*, 14(3), 473–481. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1136842>
- Kamau, E. H., Nkhata, S. G., & Ayua, E. O. (2020). Extrusion and nixtamalization conditions influence the magnitude of change in the nutrients and bioactive components of cereals and legumes. *Food Science & Nutrition*, 8(4), 1753-1765. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1473>
- Leonard, W., Zhang, P., Ying, D., & Fang, Z. (2020). Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 19(1), 218-246. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12514>
- León-López, L., Reyes-Moreno, C., Ley-Osuna, A. H., Perales-Sánchez, J. X. K., Milán-Carrillo, J., Cuevas-Rodríguez, E. O., & Gutiérrez-Dorado, R. (2019). Improvement of nutritional and nutraceutical value of nixtamalized maize



- tortillas by addition of extruded chia flour. *Biotechnia*, 21(3), 56–66. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v21i3.1012>
- León Murillo, J. R., Gutiérrez Dorado, R., Reynoso Camacho, R., Milán Carrillo, J., Perales Sánchez, J. X. K., Cuevas Rodríguez, E. O., & Reyes Moreno, C. (2021). Tortillas preparadas con harinas extruidas de maíz azul y semillas de chía como una opción de alimento nutritivo y nutracéutico. *Agrociencia*, 55(6), 487-506. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i6.2555>
- Milán-Carrillo, J., Gutiérrez-Dorado, R., Perales-Sánchez, J. X. K., Cuevas-Rodríguez, E. O., Ramírez-Wong, B., & Reyes-Moreno, C. (2006). The optimization of the extrusion process when using maize flour with a modified amino acid profile for making tortillas. *International Journal of Food Science & Technology*, 41(7), 727-736. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00997.x>
- Reyes-Moreno, C., Reyes Fernández, P., Cuevas-Rodríguez, E. O., Milán Carrillo, J., & Mora-Rochín, S. (2018). *Changes in Nutritional Properties and Bioactive Compounds in Cereals During Extrusion Cooking*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68753>
- Rodiles-López, J. O., Arriaga-Martínez, L. P., Martínez-Flores, H. E., Zamora-Vega, R., & García-Martínez, R. M. (2018). Desarrollo de una tortilla adicionada con harinas de aguacate y nopal y su efecto en la reducción de colesterol, triglicéridos y glucosa en ratas. *Biotechnia*, 21(2), 71-77. <https://biblat.unam.mx/hevila/Biotechnia/2019/vol21/no2/9.pdf>
- Salazar, D., Rodas, M., & Arancibia, M. (2020). Production of tortillas from nixtamalized corn flour enriched with Andean crops flours: Faba-bean (*Vicia faba*) and white-bean (*Phaseolus vulgaris*). *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 32(10), 731-738. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i10.2179>
- Salinas-Moreno, Y., Martínez, V., Trejo-Téllez, L. I., Luis, J., Díaz, R., & Gómez, O. (2017). Composición Nutricional Y De Compuestos Bioactivos En Tortillas De Poblaciones Nativas De maíz Con Grano azul/Morado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1483–1496. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.525>
- Sánchez-Magaña, L. M., Rodríguez-Heráldez, D. A., Mora-Rochin, S., León-López, L., Reyes-Moreno, C., & Domínguez-Arispuro, D. M. (2025). Efecto de la adición de harina de lenteja en el contenido nutricional y polifenoles en tortillas de maíz azul. *Revista Biociencias*, 11, e1701. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.nesp.e170>
- Serna-Saldivar, S. O. (2017). Chapter 1 - History of Corn and Wheat Tortillas. En L. W. Rooney & S. O. Serna-Saldivar (eds.), *Tortillas. Wheat Flour and Corn Products*



- (pp. 1-28). Woodhead Publishing and AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/B978-1-891127-88-5.50001-3>
- Serna-Saldivar, S. O., & Chuck-Hernandez, C. (2019). Chapter 17 - Food Uses of Lime-Cooked Corn With Emphasis in Tortillas and Snacks. En S. O. Serna-Saldivar (ed.), *Corn. Chemistry and Technology* (Third Edition, pp. 469-500). Woodhead Publishing and AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00017-6>
- Serna-Saldivar, S. O. (2021). Understanding the functionality and manufacturing of nixtamalized maize products. *Journal of Cereal Science*, 99, 103205. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103205>
- Uuh Narváez, J. J., Us Medina, U., Muñoz Rodríguez, D., & Segura Campos, M. R. (2023). Nutritional and functional properties of corn tortillas added with cabbage as an option for diabetes management. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 32, 100706. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100706>
- Treviño-Mejía, D., Luna-Vital, D. A., Gaytán-Martínez, M., Mendoza, S., & Loarca-Piña, G. (2016). Fortification of commercial nixtamalized maize (*Zea mays* L.) with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) increased the nutritional and nutraceutical content of tortillas without modifying sensory properties. *Journal of Food Quality*, 39(6), 569-579. <https://doi.org/10.1111/jfq.12251>
- Vinayagam, R., Jayachandran, M., and Xu, B. (2016) Antidiabetic effects of simple phenolic acids: a comprehensive review. *Phytotherapy Research*, 30(2), 184–199. <https://doi.org/10.1002/ptr.5528>
- Yousefian, M., Shakour, N., Hosseinzadeh, H., Hayes, A. W., Hadizadeh, F., & Karimi, G. (2019). The natural phenolic compounds as modulators of NADPH oxidases in hypertension. *Phytomedicine*, 55, 200-213. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.phymed.2018.08.002](https://doi.org/10.1016/j.phymed.2018.08.002)
- Wu, M., Taylor, C., Zahradka, P., & Arntfield, S. (2023). Reduced in vitro starch hydrolysis and in vivo glycemic effects after addition of soy presscake to corn tortillas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(15), 7829-7835. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12863>
- Zhang, B., Liu, G., Ying, D., Sanguansri, L., & Augustin, M. A. (2017). Effect of extrusion conditions on the physico-chemical properties and *in vitro* protein digestibility of canola meal. *Food Research International*, 100(1), 658-664. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.060>



Caracterización nutricional de semillas de la milpa Amuzga (frijol, maíz y calabaza)

Nutritional characterization of Amuzga milpa seeds (beans, corn, and pumpkin)

David Fonseca-Hernández¹, Ramón Efrén Espinoza-Sosa², Soledad García-Morales³, Jhony Navat Enríquez-Vara³, David Sánchez-Sánchez⁴, Germán Bautista-García⁵, Jesús Manuel Mancillas Paredes⁶, Luis Mojica^{1*}

¹ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan, Jalisco, México.

² Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan, México.

³ Biotecnología Vegetal, SECIHTI-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan, México.

⁴ Investigador Posdoctoral SECIHTI - UDG, Maestría en Gestión y Desarrollo Social.

⁵ Investigador Posdoctoral SECIHTI - Centro de Estudios e Investigación en Biocultura, Agroecología, Ambiente, Salud, CEIBAAS, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Acapulco, Guerrero, México.

⁶ Centro de Estudios e Investigación en Biocultura, Agroecología, Ambiente, Salud, CEIBAAS, SECIHTI-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Acapulco, Guerrero, México.

*Autor de correspondencia: lmojica@ciatej.mx

Resumen

Palabras clave:

milpa, maíz, frijol, calabaza, amuzgos, composición nutricional, dieta tradicional.

La milpa Amuzga es un agroecosistema tradicional que se maneja en policultivo, es pilar fundamental en la identidad cultural y base alimentaria de la región Costa Chica de Guerrero, México. Se evaluó el contenido nutricional de semillas de frijol, maíz y calabaza colectadas en parcelas tradicionales de milpa en los municipios de Ometepec y Xochistlahuaca, Guerrero, con el propósito de revalorizarlas como fuente de nutrientes y conservar estos cultivos en la región Amuzga. Los resultados mostraron que el frijol presentó alto contenido de proteína (20.30 - 21.63%) y fibra dietética (14.86 - 15.27%), la semilla de calabaza destacó por su aporte de proteínas (29.92 - 34.97%) y grasas (30.39 - 32.48%), mientras que el maíz presentó alto contenido de carbohidratos (71.99 - 75.63%) y fibra insoluble (8.11 - 9.26%). Los resultados indican que las semillas poseen una alta calidad nutrimental. Además, constituyen un valioso recurso en la dieta, forman parte de una alimentación equilibrada y son esenciales en diversos platillos tradicionales, muestra de ello es la riqueza gastronómica, que también refleja el conocimiento ancestral y confirma la importancia de los recursos locales, por lo cual es vital mantener y valorar las variedades de maíz, frijol y calabaza en la región Amuzga.

Abstract

Keywords:

milpa, corn, beans, pumpkin, nutritional composition, traditional diet.

The Amuzgo milpa system is a traditional polyculture that integrates beans, maize, and pumpkin, serving as a fundamental pillar of the cultural and dietary identity of the Amuzga region in the Costa Chica in Guerrero, Mexico. In this study, the nutritional composition of seeds from milpa crops in Ometepec and Xochistlahuaca, Guerrero, was evaluated to highlight their value as a source of nutrients and conserving these crops in the Amuzga region. The results showed that beans exhibited a high protein content (20.30 – 21.63 %) and dietary fiber (14.86 – 15.27%), pumpkin seeds stood out for their protein (29.92 – 34.97 %) and fat (30.39 – 32.48%) content, while maize showed a high carbohydrate (71.99 – 75.63 %) and insoluble fiber (8.11 – 9.26%) content. These seeds from the milpa system are part of a balanced diet and are essential ingredients in various traditional dishes such as bean tamales, pipian, and green pozole, reflecting the ancestral knowledge and gastronomic richness of the Amuzgo communities.

Recibido: 28 de octubre 2025

Revisado: 18 de noviembre 2025

Aceptado: 30 de diciembre 2025

Publicado: 23 de febrero 2026



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

La milpa es un agroecosistema tradicional, un policultivo dinámico que ha sido fundamental para la subsistencia y el desarrollo de numerosas regiones y comunidades indígenas en México, como la región Amuzga de Guerrero. Este sistema es considerado la principal fuente de alimentación en diversas regiones rurales, se basa en la siembra conjunta e interdependiente de tres cultivos principales: maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus* spp.) y calabaza (*Cucurbita* spp.). La interacción y asociación entre estas especies con otras plantas, fauna silvestre y microorganismos generan beneficios mutuos que favorecen su crecimiento, la conservación del suelo y el aprovechamiento eficiente de los recursos. La milpa es reconocida como uno de los primeros sistemas agrícolas del continente americano y también como la base alimentaria y cultural de las civilizaciones mesoamericanas (Sánchez-Velázquez et al., 2023; Espinoza-Sosa et al., 2025). Esta forma de producir alimentos en algunas regiones de nuestro país juega un papel fundamental para promover la resiliencia agrícola, garantizar la seguridad alimentaria y conservar la biodiversidad (Romero-Natale et al., 2024). Es, además, una fuente importante de nutrientes para la salud, como parte de la dieta tradicional. Sin embargo, en la actualidad, la expansión de la agroindustria y del comercio agrícola ha desplazado gradualmente este tipo de agroecosistema para la producción de alimentos.

Al tratarse de un modelo de producción agrícola tradicional, requiere conocimientos específicos transmitidos entre generaciones, así como una considerable inversión de tiempo y una alta cantidad de mano de obra familiar y contratada, su aplicación resulta menos competitiva frente a otros modelos agrícolas modernos orientados a la producción intensiva y al mercado global (Novotny et al., 2021). Como consecuencia, en muchas regiones se ha optado por reemplazar la milpa por monocultivos con variedades híbridas derivadas del cruce de semillas tradicionales con variedades modificadas por la industria, con el objetivo de incrementar la producción y satisfacer la creciente demanda de alimentos. No obstante, en la región Amuzga de Guerrero diversos municipios habitados por comunidades indígenas conservan prácticas agrícolas ancestrales y tradiciones culturales en las que el sistema milpa sigue siendo el eje central de su vida socioeconómica y cultural (Epifanio Rayón et al., 2025).

Como complemento al manejo de la milpa, en algunas comunidades se han asociado otras especies de plantas como el chile (*Capsicum annuum* L.), el jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), la papa (*Solanum tuberosum*) y el amaranto (*Amaranthus* spp.), diversos quelites y otras plantas arvenses o medicinales (Lopez-Ridaura et al., 2021). Cada uno de los cultivos se complementa mutuamente para un desarrollo óptimo, ya que cada una de las plantas asociadas obtiene la luz solar a distintas alturas, la



planta de frijol permite fijar el nitrógeno a la tierra eficazmente y la calabaza reduce la presencia de hierbas competitivas y permite una mayor retención de humedad en el suelo (Novotny et al., 2021).

Por otra parte, la milpa no es un sistema agrícola único; su composición y manejo varían entre regiones y comunidades. Las semillas que se siembran, así como las prácticas de cultivo, dependen de los conocimientos de cada familia agricultora. Además, la diversidad de la milpa está influida por factores como la comunidad, la geografía, el clima y las características del suelo donde se desarrolla (García Franco & Gómez Galindo, 2023). En los municipios que conforman la región de Costa Chica, la siembra de la milpa también se lleva a cabo en traspatios, siendo una actividad prioritaria de niños y mujeres debido a la cercanía que genera en la familia; las madres junto con sus hijos se encargan de la siembra y recolección de los alimentos para la preparación de diversos platillos

En los municipios de Ometepec y Xochistlahuaca, pertenecientes a esta región, el sistema milpa continúa siendo una práctica agrícola importante para la población local. Por ello, el objetivo de este escrito es presentar la composición nutricional de semillas de frijol, maíz y calabaza obtenidas de los cultivos en ambas localidades, con el propósito de resaltar su valor como fuente de nutrientes y la importancia de conservar estas variedades en la región Amuzga.

Materiales y Métodos

Ubicación del área de estudio

El municipio de Ometepec se caracteriza por un clima subhúmedo, lo cual es favorable para el cultivo de la milpa; además, presenta un uso de suelo relevante para la agricultura manual continua con un 58.59% de uso potencial. Dentro de otras actividades a las que se dedica su población, destaca la fabricación artesanal de diversos utensilios de cocina como cazuelas, ollas, jarros, tazas, entre otros, lo cual impulsa el aprovechamiento de los alimentos de la milpa (INEGI, 2010). En el caso del municipio de Xochistlahuaca, al colindar con Ometepec, ambos comparten el mismo tipo de clima propicio para el desarrollo de este sistema. A pesar de no contar con una extensa superficie de uso de tierra para la agricultura, las familias aprovechan, igualmente, los terrenos de traspatio para el cultivo (INEGI, 2010). Además, debido a las características geográficas de la región, los agricultores cultivan sus alimentos en parcelas con pendientes pronunciadas y de difícil acceso.



Colecta de semillas

Las semillas de maíz, frijol y calabaza se recolectaron en dos años. La colecta se determinó considerando las investigaciones previas en la región y el trabajo *in situ* con actores locales para identificar a los agricultores que realizaran el cultivo asociado de maíz, frijol y calabaza en su parcela. La primera colecta se realizó en 2024 en el municipio de Ometepec. Durante esta se obtuvieron semillas de maíz (*Zea mays*), variedad olotillo; de frijol, variedad chaparra (*P. vulgaris*); y de calabaza, variedad roja (*C. moschata*). La segunda colecta se realizó en 2025 en el municipio de Xochistlahuaca. De esta se consiguieron semillas de maíz variedad olotillo, olotillo de olote delgado y sapo; de frijol variedad chaparro y de vara (*P. vulgaris*) y de calabaza (*Cucurbita* spp.). Las semillas fueron adquiridas directamente con los productores en cantidades de 1 a 5 kg dependiendo de la disponibilidad.

Análisis bromatológicos de semillas

En total se analizaron nueve muestras de semillas. Las semillas que presentaban daño visualmente significativo se descartaron y se muestrearon 100 g de cada variedad para realizar los análisis bromatológicos. Para estos análisis se utilizaron métodos establecidos en normas oficiales mexicanas. El contenido de humedad se determinó mediante secado en estufa, conforme a la norma NMX-F-066-S-1986. El porcentaje de proteína se obtuvo mediante el método Kjeldahl, de acuerdo con la norma NMX-F-608-NORMEX-2002. El contenido de grasa se evaluó con base en la NMX-F-615-NORMEZ-2014. En el caso de las cenizas, se obtuvieron conforme a la norma NMX-F-066-NORMEX-2020 y la fibra cruda se determinó mediante un ensayo enzimático-gravimétrico, de acuerdo con la NMX-F-427-1982 y, por último, el porcentaje de los carbohidratos se obtuvo por diferencia entre los contenidos.

Resultados y Discusión

Características fenotípicas de las semillas de la milpa

Las semillas colectadas en los municipios de Ometepec y Xochistlahuaca presentaron distintas características (Figura 1). Estas diferencias se distinguen en la forma y el color de las semillas, así como en el color de la corteza o cáscara. Entre los propios productores se cuenta con una clasificación propia, resultado de la transmisión de conocimientos, saberes y prácticas a través de las generaciones. Particularmente, una de las calabazas muy apreciadas y que se producen en la región Costa Chica de Guerrero se conoce coloquialmente como “colorada”, que corresponde a la variedad tamalayota (*Cucurbita ficifolia*). Rossel Kipping et al. (2018) caracterizaron semillas de calabaza, distinguiendo las formas planas, ovaladas, y color verde claro en su cáscara, aunque también pueden ser de tonos blancos y dorados.



Maiz olotillo
(Cochoapa, Ometepec)



Maiz sapo
(Tierra colorada,
Xochistlahuaca)



Maiz olotillo
(Guadalupe Victoria,
Xochistlahuaca)



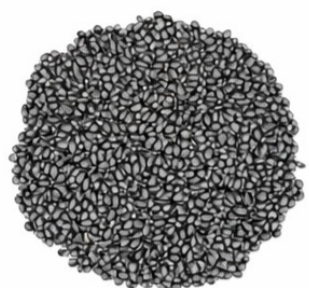
Maiz olotillo delgado
(Guadalupe Victoria,
Xochistlahuaca)



Frijol Chaparro
(Tierra colorada,
Xochistlahuaca)



Frijol de Vara
(Arroyo chivo,
Xochistlahuaca)



Frijol Chaparro
(Ometepec)



Calabaza roja
(Ometepec)



Calabaza
(Arroyo chivo,
Xochistlahuaca)

Figura 1. Semillas de maíz, frijol y calabaza. Variedades de las semillas de maíz, frijol y calabaza obtenidas en los municipios de Ometepec y Xochistlahuaca
Fuente: Elaboración propia



Composición nutricional de frijol de la zona amuzga

El frijol es una de las leguminosas que más se consumen en el mundo, ya que se trata de un alimento con un gran valor nutricional. Es una fuente rica en proteína, vitaminas, minerales, fibra dietética y con bajo contenido de grasas, a la vez que presenta diversos compuestos bioactivos como compuestos fenólicos, péptidos bioactivos, esteroides y saponinas (Alfaro-Díaz et al., 2023; Mojica et al., 2015).

En México el estado de Guerrero es uno de los estados productores de frijol; tiene una producción anual de 14,817 toneladas en 71 municipios, donde la mayor producción se da en la región Costa Chica (SIAP, 2022). Es importante destacar que este estado se ha caracterizado por presentar un gran porcentaje de variedades endémicas de frijol junto con los estados de Chiapas y Oaxaca que forman parte de la región Pacífico Sur de México, las cuales presentan una composición importante de fitoquímicos y compuestos nutricionales (Alcázar-Valle et al., 2021). Una de las variedades de frijol característica de estas regiones es el denominado “chaparro” (Figura 1), llamado así coloquialmente por la baja altura y hábito de crecimiento de la planta. Esta variedad es muy valorada por las comunidades ya que forma parte de la alimentación diaria y preparaciones culinarias debido a su sabor y fácil cocción, además de presentar una gran demanda comercial en dichas regiones (Gil-Muñoz, 2018). Las variedades de frijol “chaparro” recolectadas en los municipios de Ometepec y Xochistlahuaca fueron cultivadas en sistemas de cultivos mixtos o de policultivo, presentando una coloración negra-morada y contenidos relevantes de macronutrientes.

Los principales componentes nutricionales de la semilla de frijol son los carbohidratos que van desde un 55-60% y las proteínas que van de un 17-40% dependiendo de la variedad. En el caso de las variedades de frijol “chaparro”, el cultivo obtenido en el municipio de Ometepec presentó un 21.53% de proteína y un 59.08% de carbohidratos totales; mientras que el cultivo de frijol “chaparro” conseguido en el municipio de Xochistlahuaca presentó un 20.30% de proteína y 64.69% de carbohidratos totales (Tabla 1). De igual manera, la variedad de frijol “de vara” proveniente de Xochistlahuaca presentó un contenido de 21.63% de proteína y 65.97% de carbohidratos totales.

Composición nutricional de la semilla de calabaza de la zona amuzga

En México se producen 131,292 toneladas de calabaza al año, donde el estado de Guerrero ocupa el tercer lugar con mayor producción con cerca de 4,000 toneladas. México es un centro de diversidad del género *Cucurbita* ya que se cultivan cinco especies de calabaza: calabaza de castilla, butternut, criolla, kabocha y espagueti (SADER, 2020). La pulpa y las semillas son aprovechadas en su totalidad para la



alimentación humana, así como forraje para cerdos, como ocurre en los municipios de Ometepec y Xochistlahuaca. Las semillas presentan una gran versatilidad para ser usadas en diversos platillos típicos de la gastronomía mexicana y presentan contenidos importantes de proteína y grasa (Rossel Kipping et al., 2018). El valor nutricional de la semilla de calabaza se basa en su contenido de proteína (21.3 – 37.7%) y un alto porcentaje de grasas (43.68 – 52.61%) dependiendo de la variedad de calabaza (Sánchez-Velázquez et al., 2023). Las semillas de calabaza obtenidas de la región de la Costa Chica presentaron un porcentaje importante de grasas y proteínas. En el caso del municipio de Ometepec, la semilla de calabaza roja contiene un porcentaje de proteína de 34.97% y 30.39% de grasas, mientras que la semilla de Xochistlahuaca presentó un 29.92% de proteína y un 32.48% de grasas. Estas diferencias pueden estar influidas por factores genéticos y ambientales, así como por la altitud de cada municipio. El porcentaje de proteína presente en la semilla de calabaza roja es mayor en comparación con otras variedades de semillas de calabazas cultivadas en la península de Yucatán que presentan porcentajes de 26.9 – 33.6% (Ruiz García et al., 2020). De manera similar, las semillas de una variedad de calabaza de castilla cultivada en San Luis Potosí presentan un 28.92% de proteína y 35% de grasas, destacando la presencia de ácido linoleico y oleico (Rossel Kipping et al., 2018).

El contenido de grasa de la semilla de calabaza está compuesto por un alto porcentaje de ácidos grasos libres, principalmente por los ácidos oleico, linoleico, palmítico y esteárico, con una distribución relativa del 43.8%, 33.2%, 13.4% y 7.8%, respectivamente. El consumo de estos ácidos grasos, así como de los ácidos grasos omega-3 y omega-6 (que también están presentes en la semilla de calabaza), está asociado a la salud cognitiva y a la prevención de enfermedades relacionadas con el sistema urinario (Shaban & Sahu, 2017). La importancia gastronómica de la semilla de calabaza se basa en la diversidad de platillos que se preparan a partir de esta, como el pipián y otros moles, además de que se consumen tostadas con sal como botana.

Composición nutricional del maíz de la región Amuzga

El maíz es uno de los cultivos más importantes de México, no solo por ser la base fundamental de la alimentación nacional, sino también por su riqueza en compuestos bioactivos que pueden aportar beneficios a la salud de quienes lo consumen (Pérez Ruiz et al., 2024). México es reconocido como uno de los centros de origen y diversificación del maíz. A lo largo de miles de generaciones de cultivo y selección, las comunidades agrícolas han desarrollado alrededor de 64 variedades nativas, cada una con características únicas que reflejan la diversidad cultural y ambiental de cada región del país, como es el caso de la Costa Chica de Guerrero (Figura 2) (CONABIO, 2020).



Figura 2. Diversidad del maíz de la comunidad amuzga. El maíz se ha adaptado a diferentes regiones geográficas y representa una riqueza genética. La figura ilustra una parte de la diversidad del maíz cultivado en el sistema milpa por la comunidad amuzga
Fuente: Elaboración propia

La composición proximal en promedio de los granos del maíz es de un 70-75% de carbohidratos, 8–10% de proteína, 4–5% de grasas y 1–4% de cenizas. Sin embargo, esta composición es diferente entre variedades de maíz, lo cual resalta la importancia de preservar estas (Pérez Ruiz et al., 2024; Sánchez-Velázquez et al., 2023).

En el estado de Guerrero se pueden encontrar distintas variedades de maíz, especialmente en las regiones que colindan con el estado de Oaxaca. Es en las zonas del sureste del estado donde se ha identificado una mayor diversidad de variedades de maíz (Orozco-Ramírez et al., 2017). El maíz olotillo recolectado de un sistema milpa en el municipio de Ometepec presentó un porcentaje de proteína relevante del 10.42%, mientras que los maíces sapo, olotillo y olotillo de olote delgado recolectados en el municipio de Xochistlahuaca presentaron porcentajes de 8.02, 8.93 y 8.74%, respectivamente (Tabla 1).

Tabla 1. Composición proximal

Cultivo	Municipio	Humedad	Cenizas	Grasas	Proteínas	Fibra cruda	Carbohidratos
Maíz	Ometepec	12.69	1.16	3.74	10.42	3.45	71.99
Frijol Chaparro		13.54	4.00	1.85	21.53	7.84	59.08
Calabaza roja		6.25	4.22	30.39	34.97	4.57	24.17



Maíz sapo		11.92	1.34	2.56	8.02	3.41	76.16
Maíz olotillo		10.87	1.21	3.36	8.93	3.38	75.63
Maíz olotillo delgado	Xochistlahuaca	11.69	1.33	3.53	8.74	2.97	74.71
Frijol vara		6.90	4.46	1.04	21.63	8.02	65.97
Frijol Chaparro		9.77	4.24	1.00	20.30	7.75	64.69
Calabaza		6.48	6.38	32.48	29.92	4.65	24.74

Determinación en porcentaje en peso (%)

El porcentaje de proteína del maíz olotillo de Ometepec es comparable con el contenido de proteína de otras variedades de maíz cultivadas en Yucatán, como el caso de la variedad de maíz denominada Chichen-Itzá (de color amarillo), la cual presentó un 10.78%; y de la variedad conocida como Sac Béh (de color blanco) con un porcentaje de 9.77%, siendo estas variedades de gran importancia alimentaria en dicho estado (Chan-Chan et al., 2021).

El maíz se caracteriza por presentar un alto contenido de fibra dietaria insoluble, la cual es de gran importancia para mantener una salud intestinal óptima y evitar el desarrollo de enfermedades asociadas al sistema gastrointestinal (Timm et al., 2023). El maíz de Ometepec presentó un 8.66% de fibra insoluble, mientras que el maíz de Xochistlahuaca, que mostró un mayor contenido, fue la variedad de maíz sapo, con un 10.04% (Tabla 2).

Tabla 2. Fibra dietética

Cultivo	Municipio	Fibra dietética total	Fibra soluble	Fibra insoluble
Maíz		8.66	0.55	8.11
Frijol Chaparro	Ometepec	14.86	< 0.10	14.86
Calabaza roja		11.59	< 0.10	11.59
Maíz sapo		10.04	0.61	9.43
Maíz olotillo		9.74	0.48	9.26
Maíz olotillo delgado	Xochistlahuaca	9.43	0.42	9.01
Frijol vara		15.27	< 0.10	15.27
Frijol chaparro		15.04	< 0.10	15.04
Calabaza		11.77	< 0.10	11.77

Determinación en porcentaje en peso (%)



Dentro de su composición en grasas, están presentes algunos ácidos grasos esenciales, como el ácido linoleico, que juega un papel importante en la salud al regular la presión arterial, los niveles de colesterol en la sangre y evitar el desarrollo de enfermedades cardiovasculares. Entre otros componentes nutricionales del maíz, también se encuentran diversas vitaminas, como los complejos de vitamina B, que son benéficos para la salud de la piel, el corazón y el cerebro; así como las vitaminas A, C y K, que, junto con el betacaroteno y el selenio presentes en algunas variedades, ayudan al correcto funcionamiento del sistema inmunológico (Chaudhary et al., 2014; Rouf Shah et al., 2016).

Relevancia cultural y culinaria del agroecosistema milpa en la región Costa Chica

El maíz, el frijol y la calabaza constituyen la base alimentaria tradicional de México y elementos fundamentales en el desarrollo de su gastronomía. A lo largo de la historia, la biodiversidad de la milpa ha dado origen a una amplia variedad de platillos típicos que forman parte de la dieta cotidiana, tanto de las comunidades indígenas como de la población mexicana en general (García Franco & Gómez Galindo, 2023). La región de Costa Chica de Guerrero cuenta con una riqueza gastronómica en cuanto a platillos tradicionales preparados con los recursos naturales obtenidos de la milpa, que reflejan una mezcla de culturas e incorporan los saberes culinarios de sus ancestros y mujeres sabias.

En particular, en el territorio de Xochistlahuaca los productos de la milpa adquieren mayor importancia productiva, alimentaria y económica. Es decir, la mayoría de los productores realizan la milpa con más arraigo mediante la siembra de semillas criollas y nativas, las cuales se destinan para el autoconsumo, por lo cual, representan su principal base de seguridad alimentaria. Sin embargo, en los últimos 3 años los monocultivos de maíz híbridos van ganando terreno bajo el supuesto de mayores ventajas productivas y resistencia al acame. Además, algunas familias realizan venta de granos para diversificar sus ingresos. Se complementa la producción, ingresos y alimentos de otros agroecosistemas asociados o junto a la milpa, nos referimos a los huertos multiespecie y multiestrato donde hay una diversidad de frutales, quelites, tubérculos, semillas, hojas, cortezas, así como cañaverales, cacaotales, sistemas agroforestales, huertos de hortalizas, potreros y otros que le permite a los productores obtener continuamente gracias a la biodiversidad, de manera cíclica o temporal los productos que requiere o complementar su dieta. Es importante mencionar que, en la zona Amuzga, particularmente en Xochistlahuaca y en Tlacoachistlahuaca, las actividades implicadas en la milpa se realizan basándose en su calendario Amuzgo de



uso y distintivo sucesional. En dicho calendario se establecen como guía cuatro días y de uso sucesivo, entre ellos el día bueno, día frío, día de maldad y día de enfermedad. A su vez, estos días tienen relación directa con la lectura de las fases lunares, es decir, indican qué actividades agrícolas se pueden realizar o no, incluyendo desde la limpieza del terreno, uso de herramientas locales, siembra, asociación y relevo de cultivos, control de arvenses, aprovechamiento de la materia orgánica generada en la parcela agrícola o proveniente de la selva o del ganado, el temporal para consumir quelites, elotes, guías de calabaza, calabazas tiernas, la dobla, elaboración de tamales, cosecha de maíz y posterior elaboración de totopos, ticazos (tostada a base de maíz tierno), agua de maíz y tortillas. No todos los productores hacen uso del calendario amuzgo, solo aquellos que lo aplican, sobre todo los que lo conservan los campesinos con mayor experiencia, de edad adulta, y los que están convencidos de los resultados obtenidos en años previos o que se les ha funcionado lo puesto en práctica. Estos saberes, conocimientos y prácticas ancestrales son guardados y salvaguardados en la memoria colectiva y se heredan directamente en la práctica, en la parcela, a las infancias o compartida entre adultos. Además, como un sincretismo, cada año se hace la petición de lluvias para la buena cosecha y ofrendas en ceremonias religiosas con productos de la milpa para agradecer por la abundancia obtenida. Actualmente, los productores van incorporando en sus saberes la interpretación del comportamiento del clima cambiante para adaptarse y de ciertos animales silvestres, lectura del paisaje para iniciar o retrasar el ciclo agrícola. En estas prácticas bioculturales, los productos de la milpa son los elementos esenciales, porque fortalecen la colectividad para el trabajo, se reproducen y se intercambian los saberes, las semillas, productos y se comparten los alimentos. Uno de los alimentos más representativos de la gastronomía mexicana es el tamal, presente tanto en la vida cotidiana como en las celebraciones ceremoniales de comunidades indígenas y mestizas. La diversidad en sus métodos de preparación y cocción ha dado lugar a una gran variedad regional, en la que cada versión refleja aspectos culturales, sociales y económicos propios de su lugar de origen. En el estado de Guerrero, por ejemplo, se emplean el maíz blanco y el frijol chaparro para elaborar tamales de frijol, los cuales suelen servirse como acompañamiento de otros platillos tradicionales, como las sopas (Dehouve, 2019). Además, el pozole es un platillo de origen histórico, convirtiéndose en una tradición semanal que se mantiene hasta nuestros días llamada coloquialmente jueves pozolero. Este platillo es servido comúnmente en distintas festividades.

En el caso de la calabaza, se aprovecha la planta en su totalidad, principalmente las semillas, frutos, flores y las guías (ápices) para la elaboración de platillos. Las semillas de calabaza se doran a fuego lento en comal, moliéndose con la cáscara en



un molino de mano para preparar el pipián; las calabacitas se fríen y se usan como acompañamiento en diversos platillos. También, se prepara calabaza con piloncillo y leche como postre.

En las regiones de Guerrero y Oaxaca son tradicionales las llamadas sopas de guía, denominadas así porque se elaboran con los brotes tiernos de las plantas de calabaza y las enredaderas jóvenes de plantas silvestres que crecen en la milpa. El aprovechamiento de las plantas silvestres ha sido una práctica ancestral en las comunidades indígenas, reflejando un profundo conocimiento del entorno agrícola. Un ejemplo de ello es el uso de las plantas arvenses comestibles, conocidas como quelites, que complementan la dieta y aportan diversidad nutricional a los platillos tradicionales (Bastida Fracisca et al., 2024). Los quelites son recolectados y aprovechados en diversos platillos antes de que se desarrollen y generen floración, lo cual puede ocasionar una competencia con el frijol y la calabaza por los nutrientes del suelo. Los productos obtenidos de la milpa han sido aprovechados en diversas comunidades de Guerrero y Chiapas, donde este sistema de cultivo se vuelve su principal fuente de alimento.

Por otra parte, ante los cambios climáticos que pueden afectar la producción agrícola de la milpa, se han desarrollado estrategias para diversificar su aprovechamiento y obtener alimentos de alto valor nutricional y gastronómico, como el huitlacoche (*Ustilago maydis*) (Villagrán et al., 2023). Este hongo comestible crece de manera parasitaria en las mazorcas de maíz, y aunque su propagación en la milpa es poco frecuente, es posible inducir su desarrollo mediante técnicas de cultivo controlado (Suastegui-Cruz et al., 2024). De esta forma el huitlacoche se convierte en un recurso sostenible y versátil que se emplea en una amplia variedad de preparaciones tradicionales como quesadillas, salsas, cremas y tamales. Además, es una oportunidad para difundir su consumo en los municipios de Ometepe y Xochistlahuaca, ya que no se aprovecha ampliamente como alimento.

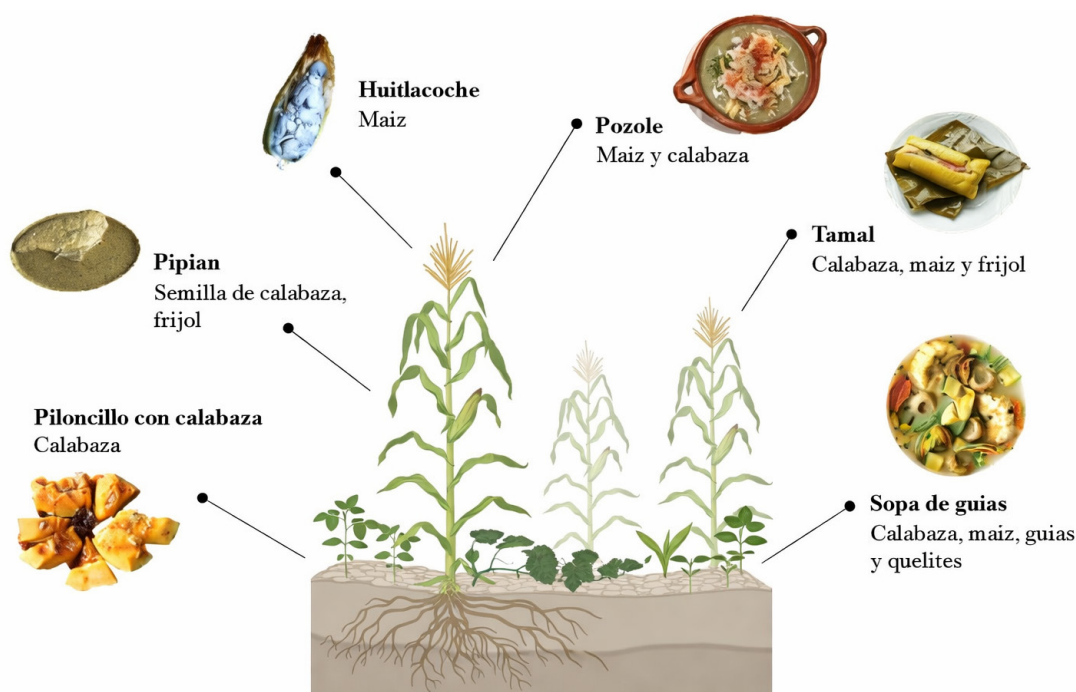


Figura 3. Platos típicos elaborados con el cultivo del sistema milpa
Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

La milpa Amuzga en la región Costa Chica de Guerrero posee una importancia nutricional y cultural. Constituye una práctica ancestral de gran valor alimentario y ecológico. Los análisis bromatológicos mostraron que las semillas obtenidas de los cultivos del sistema milpa presentan una composición rica en macronutrientes esenciales donde las variedades de frijol destacaron por su alto contenido de proteína y fibra dietética, la semilla de calabaza por sus elevadas concentraciones de grasas y proteínas saludables y el maíz por su aporte energético derivado de los carbohidratos y fibra insoluble. La milpa, además de garantizar la seguridad alimentaria de las comunidades, constituye una fuente equilibrada de nutrientes y compuestos bioactivos con potencial benéfico para la salud. La conservación y la valorización de las variedades nativas cultivadas en Ometepec y Xochistlahuaca son esenciales para mantener la identidad cultural amuzga.

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

El presente trabajo fue desarrollado como parte del proyecto “Evaluación del efecto sinérgico de la combinación de semillas criollas del sistema milpa (maíz, frijol, calabaza) sobre marcadores moleculares de obesidad y diabetes tipo 2”, de la Convocatoria Ciencia de Frontera con clave CF-2023-I-188. Este proyecto es financiado por el CONAHCYT, cuyo responsable técnico es el Dr. Luis Mojica.

Agradecimientos

Se agradece a los productores y a sus familias de los municipios de Xochistlahuaca y Ometepec por permitir la toma de fotografías de sus sistemas agrícolas y el apoyo proporcionado durante la colecta de semillas. A la ingeniera Araceli De Jesús Florentino por su apoyo en la traducción del español al amuzgo y viceversa.

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*, 11(11), 1031. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111031>
- Alfaro-Díaz, A., Escobedo, A., Luna-Vital, D. A., Castillo-Herrera, G., & Mojica, L. (2023). Common beans as a source of food ingredients: Techno-functional and biological potential. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(4), 2910-2944. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13166>
- Bastida Fracisca, I., Ávila-Nájera, D. M., Albino-Garduño, R., & Pillado Albarran, K. V. (2024). Diversidad biocultural y soberanía alimentaria: Arvenses comestibles de la milpa otomí en Santa Ana Jilotzingo, Estado de México. *Revista de Geografía Agrícola*, (73). <https://doi.org/10.5154/r.rga.2021.73.7>
- Chan-Chan, M., Moguel-Ordóñez, Y., Gallegos-Tintoré, S., Chel-Guerrero, L., & Betancur, D. (2021). Caracterización química y nutrimental de variedades de maíz (*Zea mays* L.) de alta calidad de proteína (QPM) desarrolladas en Yucatán, México.
- Chaudhary, D. P., Kumar, S., & Singh, S. (2014). *Maize: Nutrition dynamics and novel uses*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1623-0>.
- Dehouve, D. (2019). Simbolismo de las técnicas de preparación del maíz. Análisis de unos platillos tlapanecos (me'phaa) del estado de Guerrero (México). Itinerarios. *Revista de estudios lingüísticos, literarios, históricos y antropológicos*, 29, 97-118. <https://doi.org/10.7311/ITINERARIOS.29.2019.04>



- Epifanio Rayón, J. M., Rojas Hernández, S., Romero Rosales, T., Toledo Aguilar, R., Olivares Pérez, J., & Olea Reséndiz, M. D. J. (2025). Characterization of the milpa system in four rural communities. *Agro Productividad*, 18(7), 75-85. <https://doi.org/10.32854/zvscm097>
- Espinoza-Sosa, R. E., Mojica Contreras, L., Alcázar-Valle, M., Enríquez-Vara, J. N., Contreras, J., Sánchez Sánchez, D., & García-Morales, S. (2025). La milpa, análisis y revalorización de un sistema ancestral para la producción agrícola de alimentos. *Enfoques transdisciplinarios: ciencia y sociedad*, 3(2), 93–108. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15851440>
- García Franco, A., & Gómez Galindo, A. A. (2023). La milpa y la alimentación en México. *Educación Química*, 34(número especial), 108-116. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.4.86339e>
- Gil-Muñoz, A. (2018). EL FRIJOL “CHAPARRO” (*Phaseolus vulgaris* L.) ENTRE LOS NA SAVI DE COPANATOYAC, GUERRERO, MÉXICO: APORTES A SU CONOCIMIENTO. *Agro Productividad*, 11(10), 137-143. <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i10.1258>
- Lopez-Ridaura, S., Barba-Escoto, L., Reyna-Ramírez, C. A., Sum, C., Palacios-Rojas, N., & Gerard, B. (2021). Maize intercropping in the milpa system. Diversity, extent and importance for nutritional security in the Western Highlands of Guatemala. *Scientific Reports*, 11(1), 3696. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82784-2>
- Mojica, L., Meyer, A., Berhow, M. A., & De Mejía, E. G. (2015). Bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) have similar high antioxidant capacity, *in vitro* inhibition of α -amylase and α -glucosidase while diverse phenolic composition and concentration. *Food Research International*, 69, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.12.007>
- Novotny, I. P., Tittone, P., Fuentes-Ponce, M. H., López-Ridaura, S., & Rossing, W. A. H. (2021). The importance of the traditional milpa in food security and nutritional self-sufficiency in the highlands of Oaxaca, Mexico. *PLOS ONE*, 16(2), e0246281. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246281>
- Orozco-Ramírez, Q., Perales, H., & Hijmans, R. J. (2017). Geographical distribution and diversity of maize (*Zea mays* L. subsp. *Mays*) races in Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 64(5), 855-865. <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0405-0>
- Pérez Ruiz, R. V., Aguilar Toalá, J. E., Cruz Monterrosa, R. G., Rayas Amor, A. A., Rodríguez, M. H., Villasana, Y. C., & Pérez, J. H. (2024). Mexican native maize: Origin, races and impact on food and gastronomy. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 37, 100978. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.100978>



- Romero-Natale, A., Acevedo-Sandoval, O. A., & Sanchez-Porras, A. (2024). Ecosystem Services in the Milpa System: A Systematic Review. *One Ecosystem*, 9, e131969. <https://doi.org/10.3897/arphapreprints.e132792>
- Rossel Kipping, E. D., Ortiz Laurel, H., Amante Orozco, A., Durán García, H. M., & López Martínez, L. A. (2018). Características físicas y químicas de la semilla de calabaza para mecanización y procesamiento. *Nova Scientia*, 10(21), 61-77. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1467>
- Rouf Shah, T., Prasad, K., & Kumar, P. (2016). Maize—A potential source of human nutrition and health: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 2, 1166995. <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1166995>
- Ruiz García, J. L., Villalobos-González, A., Cetzal Ix, W. R., López-Hernández, M. B., Rangel-Fajardo, M. A., & García-Sandoval, J. Á. (2020). Análisis proximal de accesiones de calabaza chihua en la Península de Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(8), 1725-1736. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.1931>
- Sánchez-Velázquez, O. A., Luna-Vital, D. A., Morales-Hernández, N., Contreras, J., Villaseñor-Tapia, E. C., Fragoso-Medina, J. A., & Mojica, L. (2023). Nutritional, bioactive components and health properties of the milpa triad system seeds (corn, common bean and pumpkin). *Frontiers in Nutrition*, 10, 1169675. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1169675>
- Shaban, A., & Sahu, R. P. (2017). Pumpkin Seed Oil: An Alternative Medicine. *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research*, 9(2), 11. <https://doi.org/10.25258/phyto.v9i2.8066>
- Suastegui-Cruz, S., Martínez-Carrera, D., Sánchez, M., Bonilla, M., Castillo, I., Morales, A., Fernández, N., Petlaco, B., & Martínez, W. (2024). Integration of the Controlled Production of Huitlacoche (*Ustilago maydis* + *Zea mays*) in the Traditional Milpa System from Guerrero, Mexico. *Sustainability*, 16(23), 10666. <https://doi.org/10.3390/su162310666>
- Timm, M., Offringa, L. C., Van Klinken, B. J.-W., & Slavin, J. (2023). Beyond Insoluble Dietary Fiber: Bioactive Compounds in Plant Foods. *Nutrients*, 15(19), 4138. <https://doi.org/10.3390/nu15194138>
- Villagrán, Z., Martínez-Reyes, M., Gómez-Rodríguez, H., Ríos-García, U., Montalvo-González, E., Ortiz-Basurto, R. I., Anaya-Esparza, L. M., & Pérez-Moreno, J. (2023). Huitlacoche (*Ustilago maydis*), an Iconic Mexican Fungal Resource: Biocultural Importance, Nutritional Content, Bioactive Compounds, and Potential Biotechnological Applications. *Molecules*, 28(11), 4415. <https://doi.org/10.3390/molecules28114415>

Formulación de harinas funcionales a partir de semillas de la milpa para su aplicación en un modelo de panificación

Functional flour formulation from milpa-derived seeds for application in a bakery model

Jesús Pedro Paniagua Rivas^{1,2}, José Eduardo Michel Páez^{1,2}, Jonhatan Contreras-Negrete², Filiberto Ramírez², Luis Mojica², Montserrat Alcázar-Valle^{2*}

¹ Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Tlaquepaque, México.

² Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Zapopan, México.

*Autor de correspondencia: ealcazar@ciatej.mx

Palabras clave:

harina funcional, sistema milpa, *pancakes*, calidad nutricional, maíz, frijol y calabaza.

Keywords:

functional flours, milpa system, *pancakes*, nutrition quality, maize, beans and pumpkin.

Resumen

El objetivo de este estudio fue desarrollar una harina funcional a partir de semillas de la milpa (maíz, frijol y calabaza) para aprovechar sus propiedades nutricionales y tecno-funcionales. Además de evaluar su aplicación en la preparación de *pancakes*. A partir de semillas del sistema milpa pigmentadas y no pigmentadas, se obtuvieron harinas mediante desinfección, remojo, cocción, secado, molienda y tamizado. Se analizó la composición bromatológica, la capacidad de absorción de agua y de aceite, la solubilidad, la densidad, el pH, el color (CIEL*a*b*) y la textura, así como una evaluación sensorial mediante una escala hedónica de diez puntos. Los resultados mostraron contenidos proteicos superiores ($\approx 20\%$) respecto a la harina control (4%), así como una mayor capacidad de absorción de agua (1.7 g/g frente a 0.5 g/g). La cohesividad fue similar entre las formulaciones ($p > 0.05$) y la aceptación sensorial alcanzó el 74.1% (puntajes > 6.0). Se concluye que la harina de milpa presenta un alto valor nutricional y propiedades funcionales prometedoras para productos horneados, lo que la convierte en una alternativa sustentable y saludable.

Abstract

The objective of this study was to develop a functional flour from milpa seeds (maize, beans, and pumpkin) to leverage their nutritional and techno-functional properties. Additionally, its application in pancake preparation was evaluated. Flours were obtained from pigmented and non-pigmented seeds of the milpa system by cleaning, soaking, cooking, drying, milling, and sieving. Bromatological composition, water and oil absorption capacities, solubility, bulk density, pH, color (CIEL*a*b*), and texture were analyzed, as was a sensory evaluation using a ten-point hedonic scale. Results showed higher protein content ($\approx 20\%$) than in the control flour (4%) and a greater water absorption capacity (1.7 g/g vs. 0.5 g/g). Cohesiveness was comparable across the formulations ($p > 0.05$), and sensory acceptance was 74.1% (scores > 6.0). It is concluded that milpa flour has a high nutritional value and promising functional properties for bakery applications, making it a sustainable and healthy alternative.

Recibido: 22 de octubre 2025
Revisado: 05 de diciembre 2025
Aceptado: 18 de diciembre 2025
Publicado: 23 de febrero 2026



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

La malnutrición sigue siendo uno de los principales desafíos de salud a nivel mundial, incluyendo la desnutrición, las deficiencias de micronutrientes, así como el sobrepeso y la obesidad (WHO, 2024). En 2022, se estimó que el 43% de la población adulta mundial presentó sobrepeso y el 16% obesidad (WHO, 2025; Torero Cullen, 2025). En México, las tasas de sobrepeso y obesidad son preocupantes; entre niños y adolescentes, más del 30% sufren sobrepeso, y en adultos, más del 70% se consideran con sobrepeso u obesidad, lo que representa un incremento del 42% desde el año 2000 (Zárate-Ortiz et al., 2019). Estas condiciones han provocado un aumento de las enfermedades crónicas, como la diabetes tipo 2, la hipertensión y las cardiopatías (Shamah-Levy et al., 2021).

Los productos de panificación elaborados con harinas refinadas tienden a ser densos en términos energéticos y a presentar un alto contenido de carbohidratos, con frecuencia acompañados de grasas y azúcares añadidos; este perfil favorece dietas desequilibradas que pueden derivar en deficiencias de micronutrientes, así como en el sobrepeso (Torero Cullen, 2025). Una estrategia prometedora para mejorar su calidad nutricional consiste en incorporar ingredientes tradicionales. En México y Centroamérica, el sistema milpa, conformado por maíz, frijol y calabaza, ofrece una combinación con elevado potencial nutritivo, cuya integración en la formulación de alimentos podría contribuir a elevar la calidad nutricional (Lozada-Aranda et al., 2017).

El sistema milpa ha sido reconocido por generar sinergias nutricionales significativas gracias a la combinación complementaria de sus componentes (Damián Huato, 2023). El maíz (*Zea mays* L.) es el cereal energético por excelencia; sin embargo, carece de algunos aminoácidos, como la lisina y el triptófano (Chan-Chan et al., 2021). Al combinarse con el frijol, que aporta estos aminoácidos, se eleva el valor biológico de la proteína, lo que permite un perfil proteico más equilibrado (Aguilar Castillo, 2024). El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), además de aportar un alto contenido de proteína (17–40%), puede aportar otros micronutrientes, como vitaminas, minerales y compuestos bioactivos, como los compuestos fenólicos (Alcázar-Valle et al., 2021; Flores López, 2024), mientras que las semillas de calabaza (*Cucurbita* spp.) aportan ácidos grasos insaturados, fibra, vitaminas y minerales (Lemus-Mondaca et al., 2019). Aprovechar estos ingredientes ancestrales en la elaboración de harinas compuestas podría mejorar la calidad nutricional de los alimentos, en particular en la industria de la panificación.

El desarrollo de harinas compuestas emplea diseños de mezcla para optimizar las proporciones según metas nutricionales y tecnológicas, seguidos de análisis de propiedades tecno-funcionales para anticipar el rendimiento en la formulación de masas y batidos (Salazar Silvestre, 2019; Cconocc Roca, 2023). Algunos reportes señalan que

mezclar harinas de leguminosas con cereales aumenta el contenido de proteínas y de fibra en panes y tortillas. También se ha documentado que al reemplazar parcialmente la harina de trigo por harina de frijol blanco (hasta un 9%), se conservan el volumen y la textura de los productos de panificación y se mejora el contenido de proteína (Eusebio Quispe, 2024; Flores Chaca, 2022). Finalmente, se ha reportado que la evaluación sensorial confirma que las sustituciones moderadas de ingredientes mantienen o mejoran la aceptación (aroma, sabor, color, textura, esponjosidad) en comparación con los controles tradicionales (González Samayoa, 2024). El presente estudio tiene como objetivo desarrollar y evaluar una harina compuesta de maíz, frijol y semilla de calabaza para su aplicación en un modelo de panificación.

Materiales y Métodos

Preparación de harinas

Preparación de harina de maíz

Se realizó el tratamiento del maíz mediante nixtamalización (Rosado-Zarrabal et al., 2021; Santiago-Ramos et al., 2018). Los granos de maíz fueron cocidos en una solución acuosa de hidróxido de calcio, lo que permitió suavizar el pericarpio y el endospermo y facilitó su posterior molienda (Figura 1). Posteriormente, los granos fueron sometidos a un proceso de secado a 55 °C, con el propósito de reducir la humedad al rango de 10–12%, conservando el color natural y evitando la gelatinización del almidón. Finalmente, se realizó el enfriamiento en desecador, seguido de la molienda y el tamizado (Contreras-Jiménez, 2009)

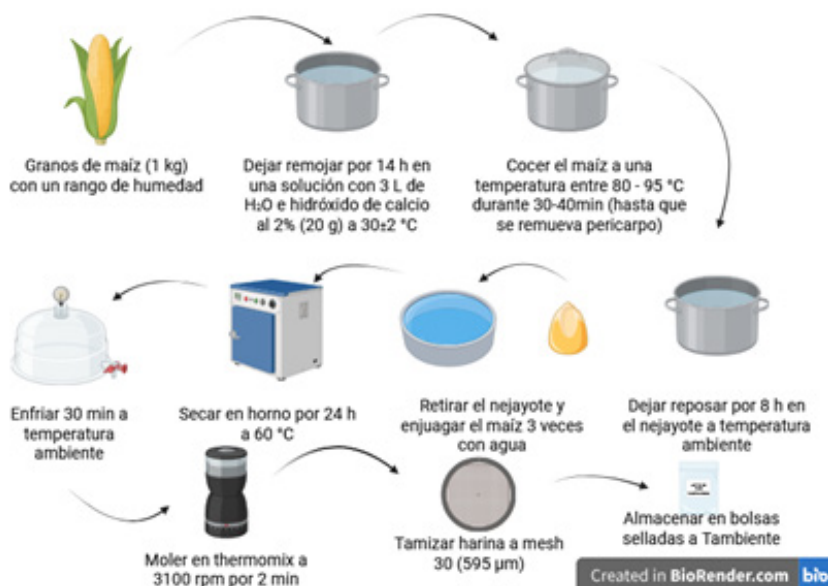


Figura 1. Metodología para la producción de harina de maíz nixtamalizado
Fuente: propia



Preparación de harina de frijol

Se preparó la harina de frijol mediante cuatro etapas principales: remojo, cocción, secado y molienda (Figura 2). El remojo se efectuó en una proporción de 1:4 (frijol: agua p/v) durante 6 h a temperatura ambiente (Singh et al., 2015). Posteriormente, se realizó la cocción del frijol. Para el frijol no pigmentado (frijol garbancillo) fue de 95 °C durante 20 min; para el frijol pigmentado (frijol chaparro) fue de 95 °C durante 10 min (Gallegos-Infante et al., 2012). El secado, de ambas accesiones de frijol se efectuó a 60 °C durante 24 h, reduciendo la humedad al 8–10% (Coffmann & Garcia, 1977). Finalmente, la molienda y el tamizado (Osuna-Gallaerdo et al., 2023).

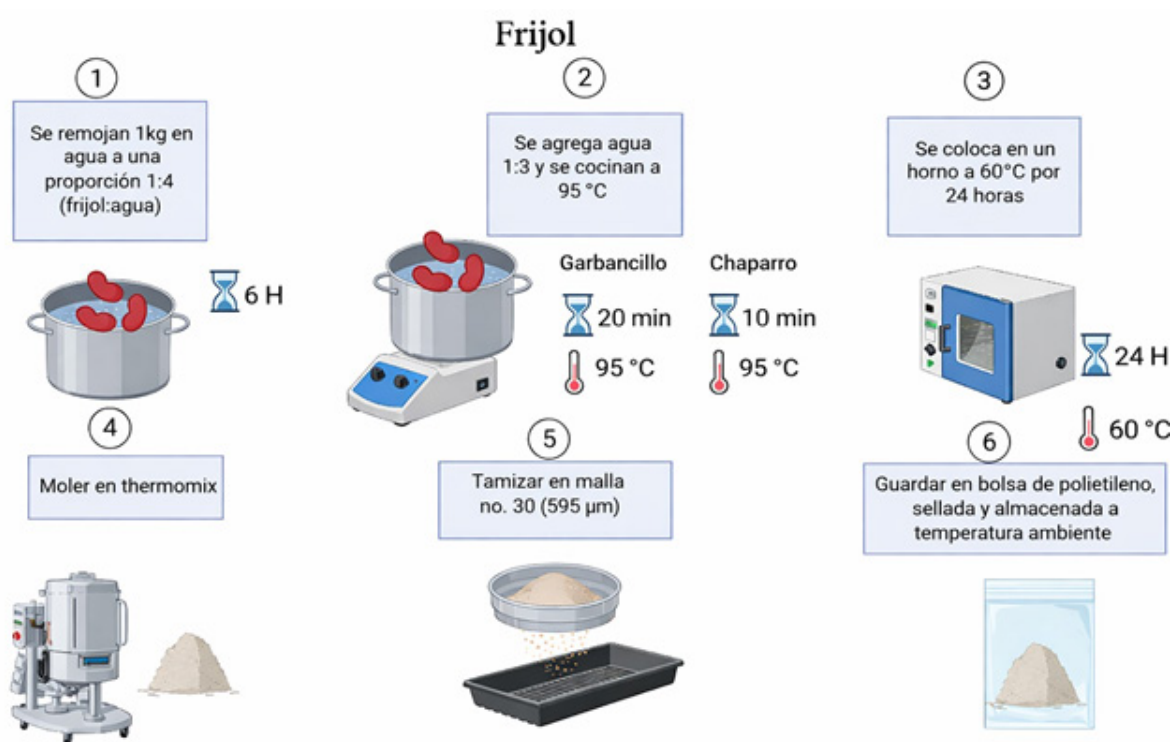


Figura 2. Metodología para la producción de harina de frijol
Fuente: propia

Preparación de harina de calabaza

Se obtuvo harina de calabaza a partir de semillas de la especie *Cucurbita spp.* (Figura 3). Las semillas fueron sometidas a un proceso de limpieza y desinfección. Posteriormente, se realizó el horneado a 60 °C durante 8 h (Nergiz & Özcan, 1999). Finalmente, las semillas deshidratadas fueron molidas en una Thermomix® y posteriormente tamizadas (Rodriguez Batista et al., 2018).

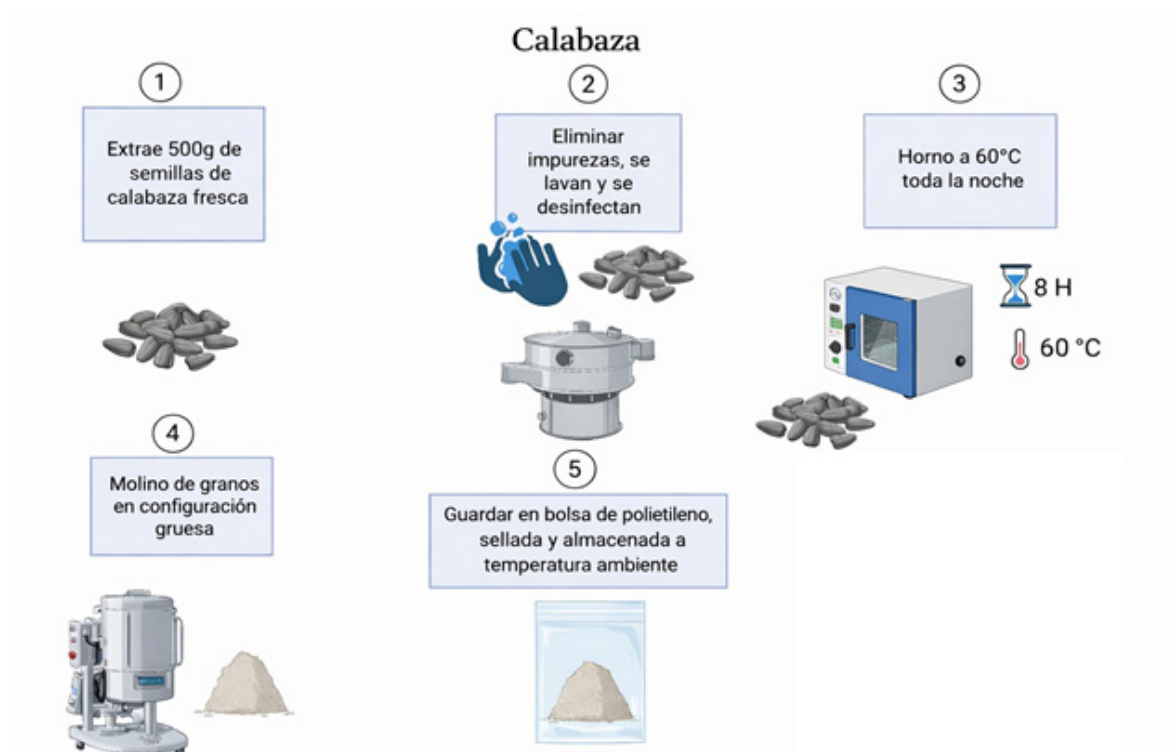


Figura 3. Metodología para la producción de harina de calabaza

Fuente: propia

Formulación de la mezcla de harinas

Con la obtención previa de las tres harinas (maíz, frijol y calabaza), se formuló una mezcla equilibrada con un alto contenido de proteína y una cantidad significativa de fibra dietética, ajustando las proporciones de cada harina para alcanzar dichos parámetros (Tabla 1). Para determinar las proporciones, se emplearon los datos del análisis bromatológico de cada harina.

Tabla 1. Composición nutrimental de la mezcla de harinas en base seca*

Tipo de semilla	Cantidad (g) en 100g	Porcentaje de propiedad nutrimental (%)				Cantidad de propiedad nutrimental (g) en 100 g de mezcla de harina			
		Proteína	Fibra	Grasas	Carbohidratos	Proteína	Fibra	Grasas	Carbohidratos
Maíz	50	10.81	9.86	4.05	73.23	5.41	4.93	2.025	36.62
Frijol	25	28.71	13.84	1.64	59.64	7.18	3.46	0.41	14.91
Calabaza	25	34.76	13.60	25.28	30.57	8.69	3.4	6.32	7.64
		Total				21.27	11.79	8.755	59.17

*Los porcentajes nutrimentales se obtuvieron a partir de un análisis bromatológico del CIATEJ



Metodología para la elaboración de *pancakes*

Para la elaboración de *pancakes*, se pesaron las harinas de maíz, frijol y calabaza. La combinación de dichas harinas se realizó conforme a la Tabla 1; posteriormente, se mezclaron hasta obtener una harina homogénea. A continuación, para preparar la masa de *pancakes*, se siguieron las instrucciones de una receta convencional que incluye huevo, leche, vainilla y fruto del monje como sustituto de azúcar. Todos los ingredientes se mezclaron hasta obtener una masa homogénea. En un sartén caliente, engrasado con mantequilla, se añadieron 30 mL de masa de *pancakes* con un aro de acero inoxidable.

Metodología para propiedades funcionales

Capacidad de absorción de agua (CAA)

Se pesaron 2 g de cada harina y se colocaron en un tubo de centrífuga de 50 mL. Posteriormente, se añadieron 40 mL de agua destilada y se agitó en un vórtex durante 1.5 min. Se dejó reposar 10 min a temperatura ambiente y, nuevamente, se agitó durante 20 s. Este procedimiento se repitió siete veces. Finalmente, los tubos se centrifugaron a 3000x g durante 25 min. El sobrenadante obtenido se descartó y los tubos con el precipitado se secaron de manera inclinada (15-20°) durante 25 min a 50 °C. Una vez seco, el precipitado fue pesado. Para obtener la capacidad de absorción de agua se utilizó la Ecuación 1 (Fernández Salvador, 2017).

$$CAA_{(g)} = \frac{\text{Peso harina sedimentada} - \text{Peso tubo vacío}}{\text{Peso harina seca}} - 1 \quad \text{Ecuación 1.}$$

Capacidad de absorción de aceite (CAAceite)

Se pesó 1 g de cada harina y se mezcló con 10 mL de aceite de soya durante 30 s. Se dejó en reposo durante 30 min a temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras se centrifugaron a 3000x g durante 30 min. Se midió el volumen del sobrenadante obtenido en una probeta de 10 mL. Para obtener el resultado, se restó al volumen de 10 mL de aceite el volumen recuperado tras el centrifugado y se reportó la capacidad de absorción de aceite (Chaparro A. et al., 2011).

Índice de solubilidad en agua (ISA)

Se pesaron 2 g de cada harina en un tubo de centrífuga y se añadieron 40 mL de agua destilada. La mezcla fue agitada cuidadosamente con varilla de vidrio y calentada en un termobañó a 90 °C durante 10 min. Posteriormente, se dejó enfriar y se centrifugó a 3000x g durante 10 min. Se separó y pesó el sobrenadante vertiéndolo



en cápsulas previamente llevadas a peso constante. Las cápsulas con sobrenadante se secaron en la estufa a 110 °C durante 24 h y, finalmente, se pesaron junto con el residuo seco. Además, se pesó la fracción residual de precipitado en los tubos (harina hidratada) (Fernández Salvador, 2017).

Análisis de perfil de textura (APT)

El análisis de textura se realizó con el equipo TA.XT.plus.Stable Micro System. La configuración fue la siguiente: sonda cilíndrica de 25 mm de diámetro Perxpen (P/25P), velocidad de 0.5 mm/s, distancia de 20% de deformación. Se realizó una prueba con ocho *pancakes* de cada mezcla. Los datos se procesaron con el software Exponent V Stable Micro System; se determinaron variables como la dureza, la cohesividad, la elasticidad y la masticabilidad (Marta et al., 2023).

Prueba sensorial

Se realizó una prueba sensorial hedónica de nivel de agrado con consumidores no entrenados, utilizando *pancakes* preparados al momento. A cada consumidor se le proporcionó una muestra codificada para su degustación. Se evaluaron los atributos de aceptabilidad general, color, textura, criterios de decisión y probabilidad de compra futura.

La evaluación se realizó mediante una encuesta digital con una escala hedónica de 10 puntos, donde 1 corresponde a “muy malo”, 5 a “regular” y 10 a “muy bueno”. La prueba se realizó con las dos formulaciones de pancake, harina de semilla pigmentada (n=27) y no pigmentada (n=28). Para el análisis de aceptabilidad, se consideraron respuestas positivas aquellas con puntuaciones iguales o superiores a 6 (“aceptable”) (Euan-Pech et al., 2024).

Análisis estadístico

Las pruebas fueron llevadas a cabo a partir de triplicados independientes, y los resultados fueron reportados como valores promedio $\pm$ desviación estándar. Además, los datos se procesaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y las pruebas de Tukey y Fisher para la comparación de medias ($p < 0.05$). Se utilizó el software STATGRAPHICS 19 (Statgraphics Technologies Inc., The Plains, VA, USA)

Resultados y Discusión

Se trabajó con variedades de semillas de maíz (*Zea mays* L.) y de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), tanto pigmentadas como no pigmentadas. En la Tabla 2 se presentan los tipos de harina obtenidos, junto con sus abreviaturas.

**Tabla 2.** Especies de semillas seleccionadas para la obtención de harinas

Abreviatura	Tipo de harina
ZM	<i>Zea mays</i> L.
ZM-P	<i>Zea mays</i> L. (pigmentado)
PV	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.
PV-P	<i>Phaseolus vulgaris</i> L. (pigmentado)
CU	<i>Cucurbita argyrosperma</i> Huber
MZ	Mezcla semillas
MZ-P	Mezcla semillas pigmentados
T	Control (harina para pancake comercial)

Para las harinas de maíz (ZM, ZM-P) y las mezclas de semillas hechas harina (MZ, MZ-P) se observaron valores de densidad intermedios (18.6-20.9 g/mL), similares a los del control (Tabla 3); estos valores indican una posible integración de componentes como almidones y proteínas, lo que sugiere un fuerte potencial de estas mezclas en relación con la harina comercial (Gudeta & Damtew, 2019). En la medición del pH se observó que las harinas presentaron los valores más alcalinos; el proceso previo de nixtamalización pudo haber generado residuos de carbonatos o hidróxidos, lo que eleva el pH. Un pH elevado favorece la gelatinización del almidón y mejora la absorción de agua en mezclas para horneados (Rosado-Zarrabal et al., 2021).

Tabla 3. Densidad (g/mL) y pH de las muestras de harina*

Muestra	Densidad (g/mL)	pH
ZM	20.87 ^D	7.5 ^F
ZM-P	19.27 ^{BC}	7.0 ^{CD}
PV	23.57 ^E	6.6 ^A
PV-P	22.93 ^E	6.8 ^B
CU	16.90 ^A	7.1 ^E
MZ	19.83 ^{BCD}	7.0 ^{DE}
MZ-P	18.60 ^B	6.9 ^C
T	20.83 ^{CD}	6.6 ^A

Los valores con letra diferente en el mismo parámetro son significativamente diferentes (n=3), de acuerdo con el análisis de Tukey (p<0.05)

Las harinas de frijol (PV y PV-P) presentaron una densidad mayor; esto se atribuye a su contenido de proteína y fibra, así como a su estructura más compacta tras el secado y la molienda, lo que sugiere que las harinas provenientes de leguminosas son menos porosas (Gudeta & Damtew, 2019). En el caso del pH, se observaron



valores más ácidos, lo que coincide con el pH natural de las proteínas vegetales y con el de los compuestos fenólicos presentes en las leguminosas. Esta característica influye positivamente en la estabilidad microbiológica, ya que un pH menor a 7 puede reducir el riesgo de deterioro microbiano (Mejía-Terán et al., 2024).

La harina de calabaza (CU) presentó la menor densidad (16.90 g/mL) debido a su alto contenido de lípidos y de fibra poco soluble, lo que genera una estructura ligera y aireada tras la molienda. En el caso del pH, se observa un valor neutro, acorde con los valores esperados de su estructura (Bekele & Emire, 2023). Para las propiedades funcionales de las harinas, se realizaron pruebas para determinar la capacidad de absorción de agua (Figura 4), la capacidad de absorción de aceite (Figura 5) y el índice de solubilidad en agua (Figura 6).

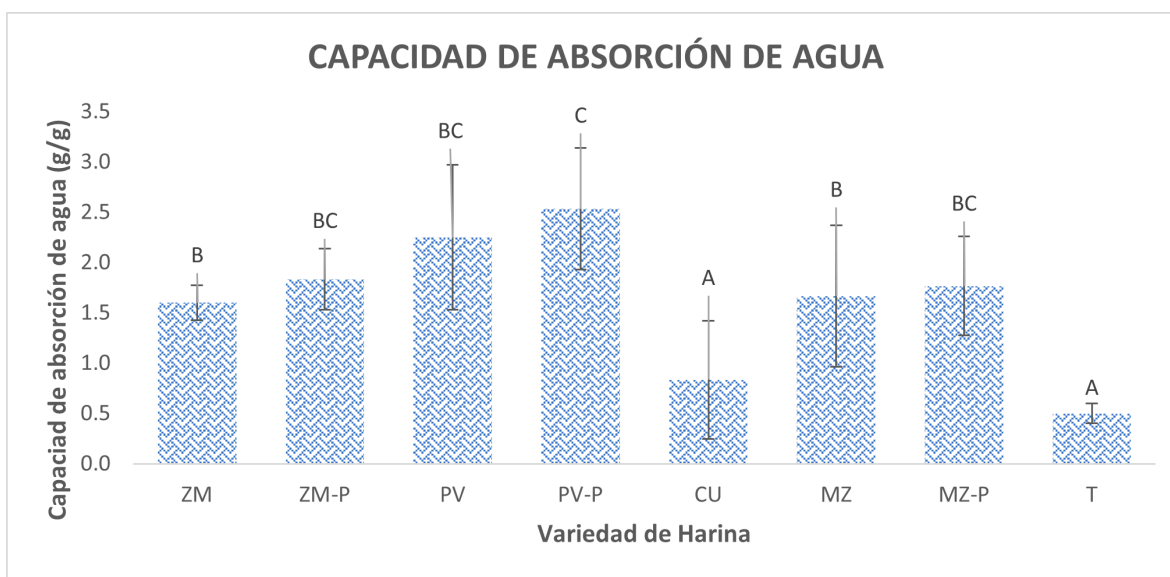


Figura 4. Capacidad de absorción de agua de las muestras de harina. Los valores con letra diferente representan diferencias estadísticamente significativas (n=3), de acuerdo con el análisis de Tukey ($p < 0.05$)

En la Figura 4 se observa que la mayor capacidad de absorción de agua correspondió al frijol pigmentado y al no pigmentado. Este comportamiento se atribuye a su alto contenido proteico dado que los grupos polares de los aminoácidos establecen interacciones hidrofílicas (puentes de hidrógeno) con el agua. Además, la presencia de polisacáridos no almidonados y de fibras puede generar la formación de una estructura proteico-fibrilar que favorece a la absorción (Gudeta & Damtew, 2019).

La harina de calabaza y la harina control presentaron los valores más bajos en la capacidad de absorción de agua. La naturaleza hidrofóbica de los lípidos presentes en la calabaza, junto con su bajo contenido de almidón, es factor que disminuye esta propiedad funcional (Bekele & Emire, 2023; Himani Ruwanthika et al., 2023). En



el caso de la harina control, los procesos industriales como el secado intensivo, la incorporación de agentes emulsionantes o antiaglutinantes, o una posible reducción del contenido de fibra, reducen la capacidad de absorción (Mathobo et al., 2021). Los resultados obtenidos para la absorción de aceite se muestran en la Figura 5. Se observa que las harinas que presentaron mayor absorción fueron la de maíz no pigmentado, la de frijol no pigmentado y la harina control.

En el caso de la harina de maíz no pigmentado, este aumento en la capacidad de absorción de aceite se puede deber a la nixtamalización previa, debido a la desnaturalización de proteínas, lo que provocó que su grupo hidrofóbico interactuara con las cadenas de ácidos grasos del aceite, provocando una absorción mayor (Arendt & Zannini, 2013).

La harina de frijol, al presentar un alto contenido proteico y una estructura menos expuesta a grupos hidrofóbicos, también presenta una absorción considerable, aunque no tan alta como en el maíz no pigmentado (Gudeta & Damtew, 2019). La harina control también presentó un valor alto; lo anterior puede deberse a factores como la adición de emulsificantes, lípidos residuales y superficies más porosas, que aumentan su afinidad por el aceite debido a regiones hidrofóbicas expuestas que lo atrapan por adsorción capilar (Yousif et al., 2012).

Las harinas de calabaza y las harinas pigmentadas presentaron la menor capacidad de absorción de aceite (Figura 5). En el caso de la harina de calabaza, se puede deber su contenido proteico, almidones y una matriz rica en fibra dietética, con propiedades altamente hidrofílicas. Mientras que las harinas pigmentadas, al contener compuestos fenólicos, pueden interactuar con proteínas y polisacáridos modificando la estructura de estas moléculas, lo que puede provocar una baja absorción (Bekele & Emire, 2023; Czajkowska-González et al., 2021).

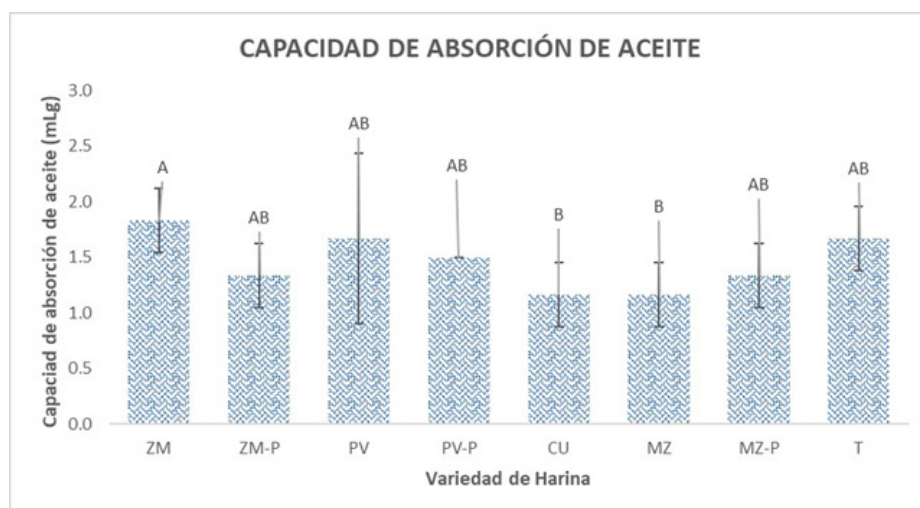


Figura 5. Capacidad de absorción de aceite de las muestras de harina. Los valores con letra diferente representan diferencias estadísticamente significativas ($n=3$), de acuerdo con el análisis de Fisher ($p<0.05$).



En la Figura 6 se observa que las harinas con mayor índice de solubilidad en agua fueron la control, calabaza y frijol no pigmentado, mientras que las de maíz y las mezclas de milpa presentaron los valores más bajos. La elevada solubilidad de las primeras se asocia a su mayor contenido de compuestos hidrofílicos, como proteínas solubles, azúcares simples y fibras solubles, que favorecen su dispersión en medios acuosos (Drago et al., 2007; Osuna-Gallardo et al., 2023).

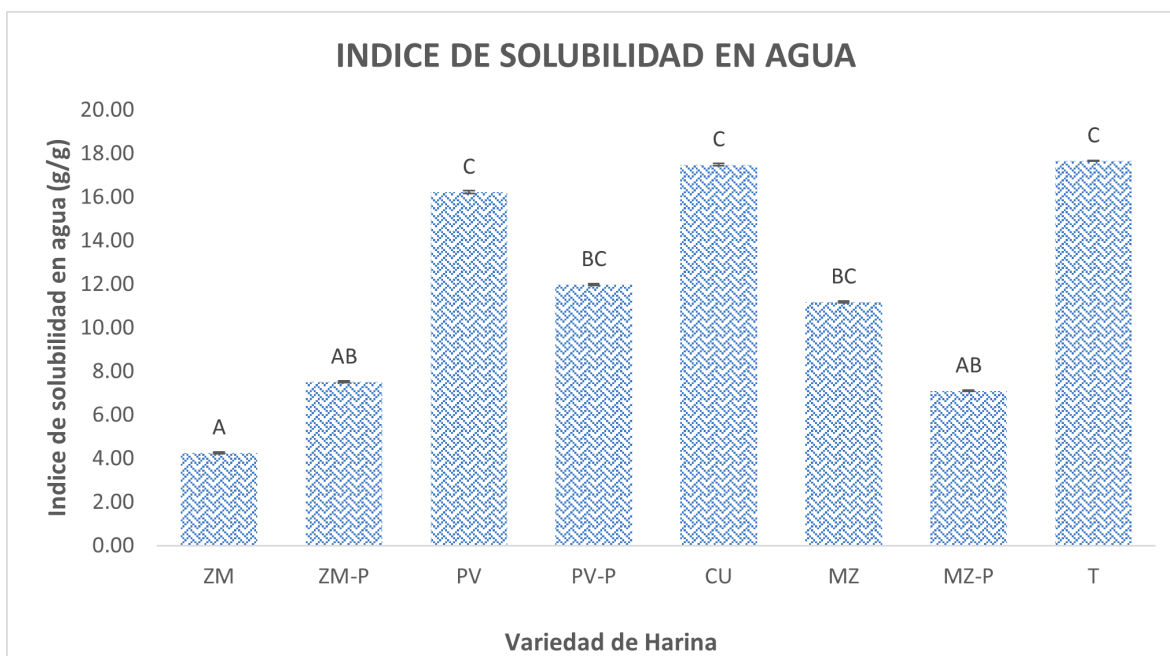


Figura 6. Índice de solubilidad en agua de las muestras de harina. Los valores con letra diferente representan diferencias estadísticamente significativas ($n=3$), de acuerdo con el análisis de Tukey ($p<0.05$)

En contraste, el maíz nixtamalizado mostró menor solubilidad (Figura 6) debido a las modificaciones estructurales inducidas por la nixtamalización, que reducen la solubilidad de los almidones y las proteínas. Asimismo, las mezclas pigmentadas de milpa (MZ-P) evidenciaron una menor solubilidad, atribuible a la presencia de compuestos fenólicos, que pueden formar complejos con proteínas y limitar la disponibilidad de fracciones solubles (Czajkowska-González et al., 2021).

Para determinar la textura de los *pancakes*, se prepararon muestras a partir de las harinas del control (T), de la mezcla no pigmentada (MZ) y de la mezcla pigmentada (MZ-P), y se sometieron a una prueba de análisis de textura (APT). Los resultados se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Análisis APT de las muestras de *pancakes*

Parámetro	Control	Pancake milpa	Pancake milpa pigmentado
Dureza (N)	2.32±0.87 ^A	3.43±1.89 ^A	5.57±1.25 ^A
Adhesividad (N*s)	-0.0038±0.004 ^A	-0.0052±0.0035 ^A	-0.0023±0.0031 ^A
Elasticidad (mm)	1.03±0.12 ^A	1.34±1.39 ^A	0.99±0.18 ^A
Cohesividad (NS)	0.90±0.022 ^B	0.89±0.89 ^{AB}	0.87±0.021 ^A
Gomosidad (N)	1.71±0.76 ^A	3.06±1.69 ^A	4.96±1.05 ^A
Masticabilidad (N)	1.73±0.72 ^A	3.59±2.63 ^A	5.22±0.91 ^A

Los valores con letra diferente en el mismo parámetro son significativamente diferentes ($p < 0,05$), de acuerdo a la prueba de Tukey ($n=8$)

En el parámetro de dureza, las muestras basadas en las mezclas de las semillas de la milpa mostraron un incremento con respecto al control (3.43 N y 5.57 N frente a 2.32 N, respectivamente), lo cual puede atribuirse a su mayor contenido de fibra dietética y compuestos fenólicos, responsables de generar estructuras más compactas y de menor deformabilidad (Mejía-Terán et al., 2024).

La adhesividad fue baja en todas las formulaciones, observándose el valor más reducido en el pancake elaborado con la mezcla de semillas de milpa pigmentadas (Tabla 4), lo que sugiere una menor adherencia superficial asociada a la presencia de almidones y azúcares modificados que limitan la retención de humedad libre (Bressani et al., 2001)

En cuanto a la elasticidad, el pancake elaborado a partir de semillas de milpa no pigmentadas (1.34 mm) presentó el valor más elevado, lo que indica una estructura más flexible y aireada en comparación con las demás muestras. La cohesividad se mantuvo alta en todas las formulaciones (0.87–0.90), lo que refleja una estructura interna resistente a la compresión, probablemente favorecida por la interacción entre proteínas y almidones (Fernández Salvador, 2017).

Respecto a la gomosidad y la masticabilidad, los valores más altos correspondieron al pancake elaborado a partir de la mezcla de semillas de milpa pigmentadas (4.96 N y 5.22 N, respectivamente), lo cual indica una textura más firme y resistente al masticado, relacionada posiblemente con una proporción mayoritaria de fibra insoluble y compuestos fenólicos que refuerzan la matriz proteico-almidonosa (Bekele & Emire, 2023).

En el análisis sensorial con consumidores, los resultados (Figura 7) muestran que el color fue el atributo mejor valorado, con una alta aceptabilidad visual (puntuajes > 8). En contraste, la textura obtuvo puntajes de 5 para el *pancake* elaborado con semillas pigmentadas y de 6 para el elaborado con semillas no pigmentadas. Lo anterior puede deberse a una sensación granulosa percibida durante la degustación, asociada al tamaño de partícula resultante del proceso de molienda y tamizado.



La aceptabilidad general obtuvo un puntaje de 8, lo que evidencia una buena aceptación del producto final por parte de los consumidores. Sin embargo, los resultados sugieren una oportunidad de mejora en la homogeneidad y la suavidad de la textura, optimizando etapas críticas del proceso, como la molienda y el control del tamaño de partícula, con el fin de alcanzar una mayor uniformidad sensorial y competitividad del producto en el mercado.

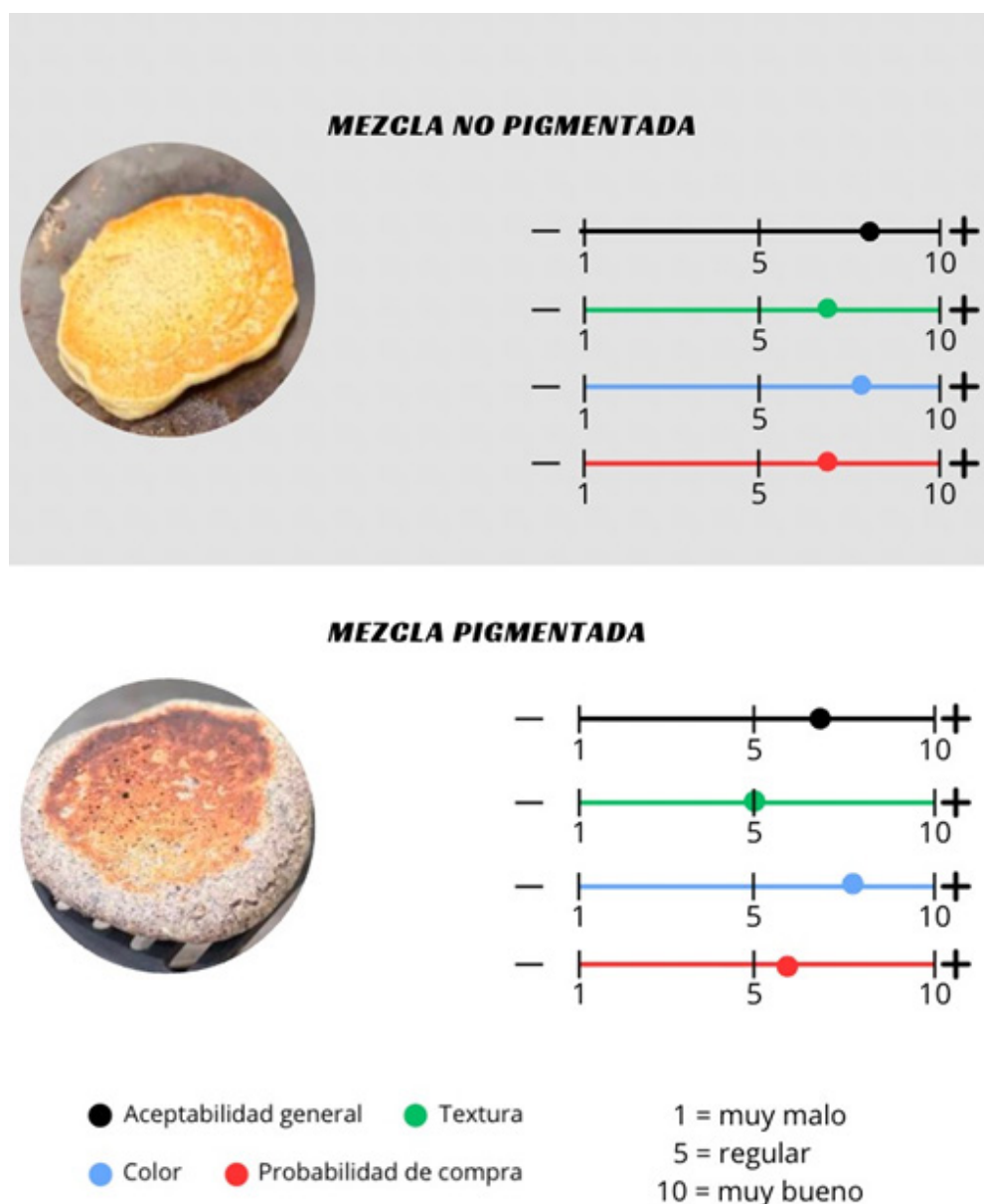


Figura 7. Prueba sensorial con consumidores, mezcla de harina de semilla no pigmentada (n=28) y mezcla de harina de semilla pigmentada (n=27)
Fuente: propia



Conclusiones

El presente estudio presenta una opción para la formulación de harinas funcionales a partir de semillas del sistema milpa y su posible empleo en un modelo de panificación (*pancake*). Con base en los resultados obtenidos, se concluye que las propiedades tecno-funcionales evaluadas, específicamente las capacidades de absorción de agua y aceite, validaron la viabilidad tecnológica de la formulación para su incorporación eficaz en matrices de panificación y repostería. Si bien la evaluación sensorial reflejó una aceptación favorable por parte del consumidor, lo que indica su potencial comercial, los resultados también señalaron la oportunidad de optimizar el proceso de molienda para mejorar atributos organolépticos, como la textura. En conjunto, la utilización de estos cultivos tradicionales no solo representa una alternativa alimentaria sustentable y competitiva, sino que contribuye activamente a la revalorización de las prácticas agrícolas ancestrales del sistema milpa.

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

Fondo de Ciencia de Frontera (CF-2023-I-188): “Evaluación del efecto sinérgico de la combinación de semillas criollas del sistema milpa (maíz, frijol, calabaza) sobre marcadores moleculares de obesidad y diabetes tipo 2”.

Referencias

- Aguilar Castillo, E. R. (2024). *Desarrollo de una galleta con sustitución parcial de harina de maíz y frijol biofortificados* [tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio del Sistema Bibliotecario Universidad de San Carlos de Guatemala <http://www.repositorio.usac.edu.gt/20215/>.
- Alcázar-Valle, M., García-Morales, S., Mojica, L., Morales-Hernández, N., Sánchez-Orsorio, 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*, 11, 1031. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111031>
- Rosado-Zarrabal, T. L., Micelli-Méndez, I., Gómez-Velasco, D. A. & Ruiz-Mendoza, C.G. (2021). Evaluation of alternative nixtamalization methods. En A. Marroquín J., Olivares, D. Ventura and L. Cruz (Eds.), *Agricultural Sciences and Biotechnology, Handbook ECORFAM* (pp. 147–157). DOI: 10.35429/H.2021.3.147. 157.



- Arendt, E. K. & Zannini, E. (2013). Maizes. En Elke K Arend, Emanuele Zannini (Eds.), *Cereal Grains for the Food and Beverage Industries* (pp. 67-113). <https://doi.org/10.1533/9780857098924.67>
- Bekele, D. W. & Emire, S. A. (2023). Effects of pre-drying treatment and particle sizes on physicochemical and structural properties of pumpkin flour. *Heliyon*, 9, e21609. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21609>
- Bressani, R., Turcios, J. C., Reyes, L. & Mérida, R. (2001). Caracterización física y química de harinas industriales nixtamalizadas de maíz de consumo humano en América Central. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 51(3), 309-313. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222001000300015&lng=es&tlng=es.
- Cconocc Roca, J. (2023). *Estudio del enriquecimiento con harina de semilla de calabaza (Cucurbita ficifolia) sobre la calidad fisicoquímica y sensorial del queque* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio de la UNSCH. <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/dae1c8ba-3c55-4dd9-bd16-3ae907cb554d>
- Chan-Chan, M., Moguel-Ordóñez, Y., Gallegos-Tintoré, S., Chel-Guerrero, L. & Betancur-Ancona, D. (2021). Caracterización química y nutrimental de variedades de maíz (*Zea mays* L.) de alta calidad de proteína (QPM) desarrolladas en Yucatán, México. *Biotechnia*, 23(2), 11-21. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i2.1334>
- Chaparro A., S. P., Gil G., J. H. & Aristizábal T., I. D. (2011). Efecto de la hidratación y la cocción en las propiedades físicas y funcionales de la harina de vitabosa (*Mucuna deeringiana*). VITAE, *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 18 (2), 133-143. <https://www.redalyc.org/pdf/1698/169822670004.pdf>
- Coffmann, C.W. & Garcia, V. V. (1977). Functional properties and amino acid content of a protein isolate from mung bean flour. *International Journal of Food Science & Technology*, 12(5), 473-484. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1977.tb00132.x>
- Contreras-Jiménez, B. L. (2009). Producción de harina instantánea de maíz nixtamalizado por calentamiento óhmico. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(2), 229-239.
- Czajkowska-González, Y. A., Alvarez-Parrilla, E., Martínez-Ruiz, N. R., Vázquez-Flores, A. A., Gaytán-Martínez, M. & de la Rosa L. A. (2021). Addition of phenolic compounds to bread: antioxidant benefits and impact on food structure and sensory characteristics. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3(25), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s43014-021-00068-8>



- Damián Huato, M. Á. (2023). Milpa, diálogo de saberes y la relación campesino-tierra. Estudios Sociales. *Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 33(62), e231335. <https://doi.org/10.24836/es.v33i62.1335>
- Drago, S. R., Velasco-González, O. H., Torres, R. L., González, R. J. & Valencia, M. E. (2007). Effect of the extrusion on functional properties and mineral dialyzability from *Phaseolus vulgaris* bean flour. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62, 43-48. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0033-5>
- Euan-Pech, E., Chel-Guerrero, L., Rodríguez-Canto, W., Gallegos-Tintoré, S. & Betancur-Ancona, D. (2024). Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and maize (*Zea mays* L.) flour mixtures for the development of healthy snacks. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 37, 100985. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.100985>
- Eusebio Quispe, L. M. (2024). *Formulación de una mezcla alimenticia instantánea de cereales y leguminosas enriquecida con harina de atacco (Amaranthus quitensis)* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio de la UNSCH <https://repositorio.unsch.edu.pe/handle/20.500.14612/7121>.
- Fernández Salvador, N. (2017). *Propiedades funcionales y químicas de harinas de distintas variedades de trigo sarraceno y TEF* [trabajo fin de máster, Universidad de Valladolid]. Repositorio Universidad de Valladolid <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/29440>
- Flores Chaca, E. A. (2022). *Elaboración de galletas dulces con sustitución parcial de harina de trigo con harina de frijol (Phaseolus vulgaris)* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva] Repositorio UNAS <https://repositorio.unas.edu.pe/items/5b00a226-fc51-485e-91e6-12d6d4e8f37a>
- Flores López, M. M. (2024). *Barras nutricionales de frijol rojo (Vigna umbellata) y frijol bayo (Phaseolus leptostachyus)* [tesis de licenciatura, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas]. Repositorio UNICACH <https://repositorio.unicach.mx/bitstream/handle/20.500.12753/5278/Melina%20Flores.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Gallegos-Infante, J.A., García Rivas, M., Chang, S., Manhey, F., Yao, R. F., Reynoso-Camacho, R., Rocha-Guzman, N. E. & González-Laredo, R. F. (2012). Effecto of the addition of common bean flour on the cooking quality and antioxidant characteristics of spaghetti. *Journal of Microbiology Biotechnology and Food Sciences*, 2(2), 730-744.
- González Samayoa, J. M. (2024). *Desarrollo de producto de panificación tipo brownie con sustitución parcial de harina de trigo utilizando frijol (Phaseolus vulgaris) variedad ICTA CHORTI fortificado* [tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio Universidad de San Carlos de Guatemala <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/20212>.



- Gudeta, D., & Damtew, E. (2019). Effect of lime and compost application on the growth and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A Review. *Advances in Oceanography & Marine Biology*, 1(3), 1-9. DOI: 10.33552/AOMB.2019.01.000512
- Himani Ruwanthika, K.O.G, Mayuri S. Munasinghe, M. L.A. & Upul J. Marapana, R.A. (2023). Overview of Cucurbita spp. and development of value-added products emphasizing its nutritional and chemical composition. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 18(2), 1215–1226. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.18.20938>
- Lemus-Mondaca, R., Marin, J., Rivas, J., Sanhueza, L., Soto, Y., Vera, N. & Puentes-Díaz, L. (2019). Semillas de calabaza (*Cucurbita maxima*): Una revisión de sus propiedades funcionales. *Revista Chilena de Nutrición*, 46(6), 783–791. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182019000600783>
- Lozada-Aranda, M., Rojas Barrera, I., Mastretta Yanes, A., Ponce-Mendoza, A., Burgeff, C., Orjuela-R., A. & Oliveros Galindo, O. (2017). Las milpas de México. *Oikos*, 17, 10–12. <https://publicaciones.ecologia.unam.mx/oikos4/images/portadas-pdfs/N17.pdf>
- Marta, H., Febiola, C., Cahyana, Y., Arifin, H. R., Fetriyuna, F. & Sondari, D. (2023). Application of composite flour from indonesian local tubers in gluten-free pancakes. *Foods*, 12(9), 1892. <https://doi.org/10.3390/foods12091892>
- Mathobo, V. M., Silungwe, H., Ramashia, S. E. & Anyasi, T. A. (2021). Effects of heat-moisture treatment on the thermal, functional properties and composition of cereal, legume and tuber starches-a review. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 412-426. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04520-4>
- Mejía-Terán, A., Blanco-Lizarazo, C. M., Leiva Mateus, J. E., Sotelo-Díaz, I., Mejía Terán, D., Geffroy, E. (2024). Pretreatments and particle size on glycemic index and rheological properties of bean flours. *International Journal of Food Science*, 2024, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2024/6336837>
- Nergiz, C., & Özcan, M. (1999). Chemical composition of kernel oils from pumpkin seed. *Food/Nahrung*, 45(5), 367–368.
- Osuna-Gallardo, E. I., Cuevas-Rodríguez, E. O., Sepúlveda-García, C. I., Reyes-Moreno, C., León-López, L., Han, R. & Hernández-Álvarez, A. (2023). *ACS Food Science & Technology*, 3(11), 1835-1853. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.2c00416>
- Singh, M., Byars, J. A., & Liu, S. X. (2015). Navy bean flour particle size and protein content affect cake quality. *Journal of Food Science*, 80(6), E1229-E1234. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12869>
- Rodrigues Batista, J. E., Pereira Braga, L., Corrêa de Olivera, R., Silva, E. P. & Damiani, C. (2018). Partial replacement of wheat flour by pumpkin seed flour



- in the production of cupcakes filled with carob. *Food Science and Technology*, 38 (2), 250-254. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.36116>
- Rosado-Zarrabal, T. L., Micelli-Méndez, I., Gómez-Velasco, D. A. & Ruiz-Mendoza, C.G. (2021). Evaluation of alternative nixtamalization methods. En A. Marroquín J., Olivares, D. Ventura and L. Cruz (Eds.), *Agricultural Sciences and Biotechnology, Handbook Ecorfam* (pp. 147–157). DOI: 10.35429/H.2021.3.147. 157.
- Salazar Silvestre, E. (2019). *Optimización por diseño de mezclas de la aceptabilidad de una mezcla alimenticia* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio UNH <https://hdl.handle.net/20.500.14597/3224>
- Santiago-Ramos, D., Figueroa-Cárdenas J. D., Mariscal-Moreno, R. M., Escalante-Aburto, A., Ponce-García, N. & Véles-Medina, J. J. (2018). Physical and chemical changes undergone by pericarp and endosperm during corn nixtamalization-A review. *Journal of Cereal Science*, 81, 108-117. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.04.003>
- Shamah-Levy, T., Cuevas-Nasu, L., Romero-Martínez, M., Gómez-Humaran, I., Ávila-Arcos, M. A. & Rivera, J. A. (2021). Nutrition status of children, teenagers, and adults from national health and nutrition surveys in Mexico from 2006 to 2020. *Frontiers in Nutrition*, 8, 777246. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.777246>
- Torero Cullen, M. (29/08/2025). *We are making progress in the fight against hunger, but not everyone equally*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/americas/opinion/detail/avanzamos-lucha-contra-hambre/en>
- World Health Organization. (2024). *Malnutrition in all its forms*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/malnutrition>
- World Health Organization. (2025). *Obesity and overweight: Key facts*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>
- Yousif, E. I., Gadallah, M.G.E., Sorour, A. M. (2012). Physico-chemical and rheological properties of modified corn starches and its effect on noodle quality. *Annals of Agricultural Science*, 57(1), 19-27. DOI:10.1016/j.aos.2012.03.008
- Zárate-Ortiz, A. G., Melse-Boonstra, A., Rodríguez-Ramírez, S., Hernández-Cordero, S. & Feskens, E. J. M. (2019) Dietary patterns and double burden of malnutrition in Mexican adolescents: Results from ENSANUT-2006. *Nutrients*, 11(11), 2753. <https://doi.org/10.3390/nu11112753>



ET ENFOQUES
TRANSDISCIPLINARIOS:
CIENCIA Y SOCIEDAD

