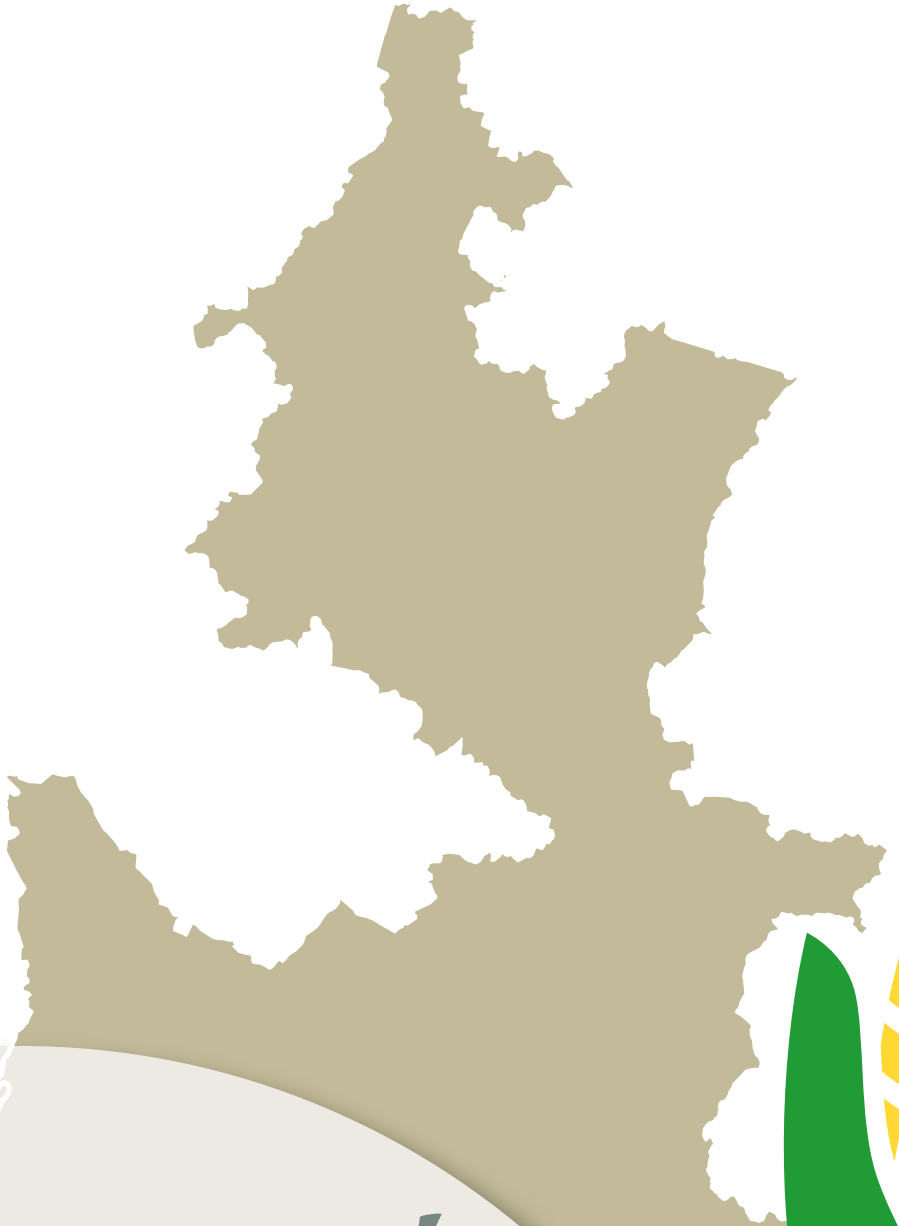




# Economía circular

Aprovechamiento integral  
de recursos agroalimentarios



**Gobierno de Puebla**  
*Hacer historia. Hacer futuro.*



**Secretaría  
de Educación**

**CONCYTEP**

Consejo de Ciencia  
y Tecnología del Estado  
de Puebla



# Economía circular

Aprovechamiento integral  
de recursos agroalimentarios









**Gobierno de Puebla**  
*Hacer historia. Hacer futuro.*



**Secretaría  
de Educación**

**CONCYTEP**  
Consejo de Ciencia  
y Tecnología del Estado  
de Puebla

# Economía circular

**Aprovechamiento integral  
de recursos agroalimentarios**



**Miguel Barbosa Huerta**

GOBERNADOR CONSTITUCIONAL DEL ESTADO DE PUEBLA

**Ana Lucía Hill Mayoral**

SECRETARIA DE GOBERNACIÓN DEL ESTADO DE PUEBLA

**Melitón Lozano Pérez**

SECRETARIO DE EDUCACIÓN DEL ESTADO DE PUEBLA

**Sergio Salomón Céspedes Peregrina**

PRESIDENTE DE LA JUNTA DE GOBIERNO Y COORDINACIÓN  
POLÍTICA H. CONGRESO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO  
DE PUEBLA

**Héctor Sánchez Sánchez**

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL SUPERIOR DE JUSTICIA DEL  
ESTADO DE PUEBLA

**Victoriano Gabriel Covarrubias Salvatori**

DIRECTOR GENERAL DEL CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
DEL ESTADO DE PUEBLA

**Maricruz Vázquez Bañuelos**

RESPONSABLE DEL ÁREA DE PUBLICACIONES

**Abigail Ramírez Beltrán**

RESPONSABLE DE DISEÑO EDITORIAL

**Luis Gerardo Aguirre Rodríguez**

DISEÑADOR EDITORIAL

**Eduardo Jáuregi Sainz de Rozas**

EDITOR LITERARIO

Primera edición, México, 2022

Publicado por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla  
(CONCYTEP) Privada B Poniente de la 16 de Sept. 4511, Col. Huexotitla,  
72534. Puebla, Pue.

ISBN: **978-607-99058-7-3**

Código identificador CONCYTEP: **c-I-2021-12-40**

La información contenida en este documento puede ser reproducida total o  
parcialmente por cualquier medio, indicando los créditos y las fuentes de origen  
respectivas.

# Índice

## Sección 01 Aprovechamiento de recursos naturales

|                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aguilar-Veloz, Laura Maryoris<br>Torres-Salinas, Ariana Fabiola<br>Díaz-Ramos, Dafne Ivette<br>Brión-Espinoza, Irvin Antonio<br>Pérez-Orozco, Juan.Pablo<br>Ortiz Basurto, Rosa Isela               | Avances y perspectivas de aplicación de biopolímeros naturales en la industria agroalimentaria mexicana . . . . . 1                                             |
| Díaz-Ramos, Dafne Ivette<br>Jiménez-Fernández, Maribel<br>García-Barradas, Oscar<br>Chacón- López Alejandra<br>López- García, Ulises<br>Ortiz-Basurto, Rosa Isela                                   | Aplicaciones tecnofuncionales de fructanos tipo inulina y agavina, potencial de los fructanos modificados . . . . . 19                                          |
| González-Hernández, Mary Carmen<br>El-Kassis, Elie Girgis<br>Argüelles-Hernández, Elizabeth<br>Pérez-Armendáriz, Beatriz                                                                            | Aprovechamiento de residuos de nopal ( <i>Opuntia ficus-indica</i> ) para la producción de metano, como una alternativa en la producción de biogás . . . . . 35 |
| Jaime-Patlán, Mariana<br>Patlán-González, Jeniffer<br>Shaaron de Jesús<br>Gómez-Salazar, Julián Andrés<br>Cerón-García, Abel<br>Osorio-Mora, Oswaldo<br>Sosa-Morales, María Elena                   | Aprovechamiento de tallos de cebolla y cáscara de tuna para la obtención de compuestos bioactivos . . . . . 49                                                  |
| Juárez-Trujillo, Naida<br>Ortiz-Basurto, Rosa Isela<br>Franco-Robles, Elena<br>Martínez-Gutiérrez, Fidel<br>Chacón-López, Martina<br>Alejandra<br>López-García Ulises<br>Jiménez-Fernández, Maribel | Potencial aprovechamiento de polímeros naturales usados como prebióticos en la encapsulación de probióticos . . . . . 67                                        |
| Ramírez-Valverde, Benito<br>Velázquez Muñoz, Crithian<br>Adolfo                                                                                                                                     | Caracterización, alimentación y aprovechamiento de recursos de las familias campesinas: estudio en un municipio del estado de Chiapas . . . . . 87              |

## Sección 02

### Moléculas funcionales

|                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aguilar-Soria, Zaira Ixchel<br>Pérez-Armendáriz, Beatriz<br>Nelly-Juárez, Zaida<br>Cardoso-Ugarte, Gabriel<br>Abraham                                                                 | Evaluación del contenido prebiótico en alimentos endémicos mexicanos: aloe vera ( <i>Aloe barbadensis</i> ), chayote ( <i>Sechium edule</i> ), chía ( <i>Salvia hispanica</i> ) y nopal ( <i>Opuntia ficus-indica</i> ) . . . . . 103 |
| Calva-Estrada, Sergio de Jesús<br>Jiménez-Fernández, Maribel<br>Lugo-Cervantes, Eugenia                                                                                               | Betalaínas, colorantes y compuestos antioxidantes naturales con potencial aplicación en la industria alimentaria: un enfoque de economía circular . . . . . 117                                                                       |
| Escárcega-Bustillos, Laura<br>Muñoz-Castellanos, Laila<br>Infante-Ramírez, Rocío<br>Salas, Erika                                                                                      | Extracción de antioxidantes de origen polifenólico a partir de residuos agroalimentarios . . . . . 133                                                                                                                                |
| Jiménez-Fernández, Maribel<br>Pascual-Pineda, Luz Alicia<br>Beristain-Guevara, César Ignacio                                                                                          | Biopolímeros naturales como agentes protectores de compuestos bioactivos . . . . . 153                                                                                                                                                |
| Rascón-Díaz, Martha Paola<br>Leal-Cerdán, Martín Alfonso<br>Bonilla-Zavaleta, Enrique<br>Beristain-Guevara, César Ignacio<br>Pascual-Pineda, Luz Alicia<br>Jiménez-Fernández, Maribel | Potencial uso de flor de Cempasúchil ( <i>Tagetes erecta</i> ) en la Industria de Alimentos . . . . . 169                                                                                                                             |
| Romero-Luna, Haydee Eliza<br>Ortiz-Basurto, Rosa Isela<br>Jiménez-Fernández, Maribel<br>González-de la Tijera, María<br>Margarita<br>Peredo-Lovillo, Audry                            | Uso de zarzamora ( <i>Rubus spp.</i> ) como ingrediente funcional en alimentos: potencial aprovechamiento de zarzamora silvestre . . . . . 183                                                                                        |
| Santiago-Ruiz, Marco Antonio<br>Totosaus, Alfonso                                                                                                                                     | Revalorización de coproductos agroindustriales del beneficio del café ( <i>Coffera arabica</i> ) en la región Frailesca, Chiapas, como fuente de compuestos bioactivos . . . . . 199                                                  |

## Sección 03 Procesamiento

|                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Navarro-Toscano Benjamín<br>Balbuena-Jaime Dulce G.<br>Ochoa-Velasco Carlos E.<br>Benítez-Rojas Alfredo C.                                                                                          | Diseño, formulación y evaluación bromatológica-sensorial de bebida a base de amaranto ( <i>Amaranthus hypochondriacus</i> ) y pitaya ( <i>Stenocereus pruinosus</i> ) . . . . . 217 |
| Rivera Nuñez, Ixtoc Marlo<br>Pérez Armendáriz, Beatriz                                                                                                                                              | Elaboración de harina de pescado a partir de residuos de actividades pesqueras de Puerto Peñasco, Sonora en México . . . . 235                                                      |
| Aguilar Ros I. D.<br>Pérez Márquez M. O.<br>Vélez Ruiz J. F.-                                                                                                                                       | Caracterización y Aprovechamiento del Suero de quesería en la elaboración de bebidas para adultos y para niños. . . . . 249                                                         |
| Aldrete-Herrera, Pamela Isabel<br>Medina-Torres, Luis<br>Ceja-Medina, Isaacs<br>Jiménez-Fernández, Maribel<br>Montalvo-González, Efigenia<br>López, Mercedes Guadalupe<br>Ortiz-Basurto, Rosa Isela | Estrategias tecnológicas para diversificar productos a partir de jugo de agave: Fracciones de fructanos . . . . . 267                                                               |
| Ramos-Martínez, Osvaldo<br>Dlaikan-Castillo, Allan Daniel<br>Hernández-Figueroa, Fernando<br>González-Regalado, José de Jesús<br>Ortiz-Basurto, Rosa Isela                                          | Evolución y actualidad de la normativa de uso y regulación de polímeros y biopolímeros en la producción de plásticos . . 283                                                        |

## Comité editorial y de arbitraje



Dra. Beatriz Pérez Armendáriz.

Doctora en Ciencias con especialidad en Biotecnología por el Instituto Politécnico Nacional, Maestría en Biotecnología e Ingeniero en alimentos por la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapala. Miembro del sistema Nacional de Investigadores Nivel 1, desde 2012 hasta la fecha. Pertenece a la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería (SMBB). En su primera línea de investigación su investigación versa sobre Alimentos funcionales con Proyectos en la producción de probióticos a partir de bebidas tradicionales mexicanas (pulque y aguamiel) y producción de nuevos productos a partir de los recursos agrícolas endémicos de la región centro Sur, en esta área de investigación se cuentan con 3 patentes otorgadas, para explotación del sector agrícola, asociadas

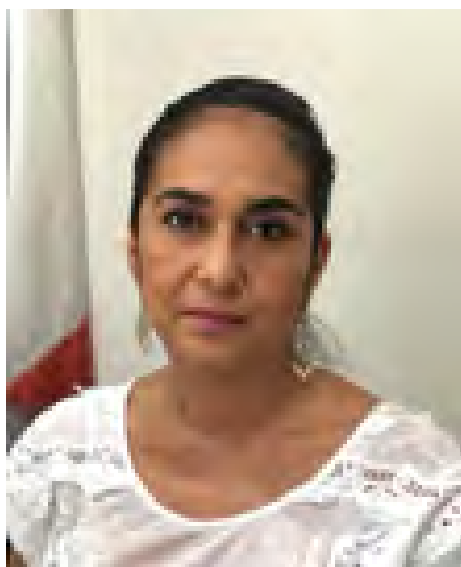
a mejora la salud en específico en la regulación de la microbiota intestinal. En la segunda línea, la Dra. Pérez se ha enfocado en trabajos sobre Biotecnología ambiental, en la recuperación de suelos agrícolas contaminados por derrames de hidrocarburos o agroquímicos utilizando sistemas de fitorremediación y composta en la región Centro. Cuenta con 35 publicaciones indizadas nacionales e internacionales, 3 certificados de patente en el área de Biotecnología agroalimentaria. Un libro y 7 capítulos de libros, hasta 2021 ha dirigido más de 50 tesis de licenciatura, maestría y doctorado y 2 estancias posdoctorales. Además de 25 años de experiencia en docencia universitaria en los niveles de pregrado y posgrado. Desde 2011 se integró a la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Actualmente es profesor-investigador de la Facultad de Biotecnología en UPAEP.



Dra. Rosa Isela Ortiz Basurto

Doctora en Ingeniería de Procesos alimentarios por la Universidad de Montpellier 2 - Instituto Europeo de Membranas Francia, con Maestría en Biotecnología orientación Bioingeniería por el IT-Veracruz e Ingeniero Bioquímico por el IT-Tehuacán. Experiencia industrial en Control de Calidad de la empresa Aceites y Proteínas el Calvario 1991-1994. Profesor-Investigador y fundadora de la carrera en Producción alimentaria de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco (1998-2009). Profesor-Investigador titular C y profesor del Posgrado en Ciencias en Alimentos del TecNM-ITTepic desde Agosto 2009. Sus área de interés son la tecnología e innovación de alimentos; Filtración con membranas para la purificación de compuestos de interés industrial

(fructanos de agave, bioactivos), secado por aspersión, encapsulación. Ha dirigido 3 tesis de Doctorado, 1 en cotutela con Universidad Grenoble Francia, 15 de Maestría, 4 tesis de Ingeniería. Ha dirigido 19 proyectos de investigación, 6 con transferencia a industria. 38 artículos indexados, 1 cuaderno técnico, 4 capítulos de libro. Lo cual le ha otorgado la distinción Perfil PRDEP y ser Miembro del Sistema Nacional de Investigación nivel 1. Asesor del concurso CENITAE 2021 en proyecto YACUB “BIOPLASTICOS DE JACA” logrando 1er lugar Nacional en categoría Next Gen Leaders. Recibió el Galardón “Mujer Inspiradora del Siglo XXI” (Global Quality Foundation 2018). Miembro del Registro de Evaluadores Acreditados (RCEA-CONACYT); Miembro del Consejo Técnico Administrativo de la Red Nacional de Agaves (AGARED); Miembro de Asociación Mexicana de Ciencias en Alimentos y Miembro de la Red de Pérdidas y desperdicios de Alimentos (ALFANUTRA).



Dra. Maribel Jiménez Fernández

La Dra. Maribel Jiménez Fernández obtuvo el grado de Químico Farmacéutico Biólogo en la Universidad Veracruzana el 1998, la de Maestra en Ciencias en Alimentos por la Universidad de las Américas Puebla en el año 2000 y la de Doctora en Ciencias en Alimentos por el Instituto Tecnológico de Veracruz en 2006. Ingresó a la Universidad Veracruzana en 2003, donde actualmente es Profesora Investigadora titular “C”, es miembro de la Academia de Ciencias y cuenta con el nivel II del Sistema Nacional de Investigadores. Sus líneas de investigación incluyen tres áreas relacionadas con el procesamiento y estabilidad de los alimentos: la estabilidad fisicoquímica y microbiológica y la encapsulación de compuestos bio-activos y el procesamiento de alimentos.

Es autora de 65 publicaciones de las cuales 60 son en revistas especializadas con arbitraje, 5 capítulos de libro y 1 artículo de divulgación. Ha impartido clases ininterrumpidamente desde el 2003 en la Universidad Veracruzana en la facultad de Químico Farmacéutico Biólogo y en la carrera de Ingeniería en Alimentos y desde el 2006 en la Maestría en Ciencias Alimentarias. Ha presentado 10 conferencias invitadas y 40 ponencias en congresos. Bajo su dirección se han concluido 30 tesis de licenciatura, 30 de maestría y 4 de doctorado.

#### Dr. Gabriel Abraham Cardoso Ugarte

---



Doctor y Maestro en Ciencia de Alimentos por parte de la Universidad de las Américas Puebla y Licenciado en Gastronomía por parte de la Universidad Autónoma del Estado de México. Es profesor-investigador de la Facultad de Gastronomía en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel Candidato desde 2018. Es autor de 11 artículos científicos en revistas indizadas internacionales y 3 capítulos arbitrados. Actualmente, dirige tesis de licenciatura y posgrado en las facultades de Gastronomía y Biotecnología de la UPAEP. Sus líneas de investigación se enfocan a la extracción y empleo de aceites esenciales como antioxidantes y antimicrobianos en sistemas alimentarios, encapsulación de compuestos bioactivos y formulación de alimentos funcionales.

#### Dr. Victoriano Gabriel Covarrubias Salvatori

---

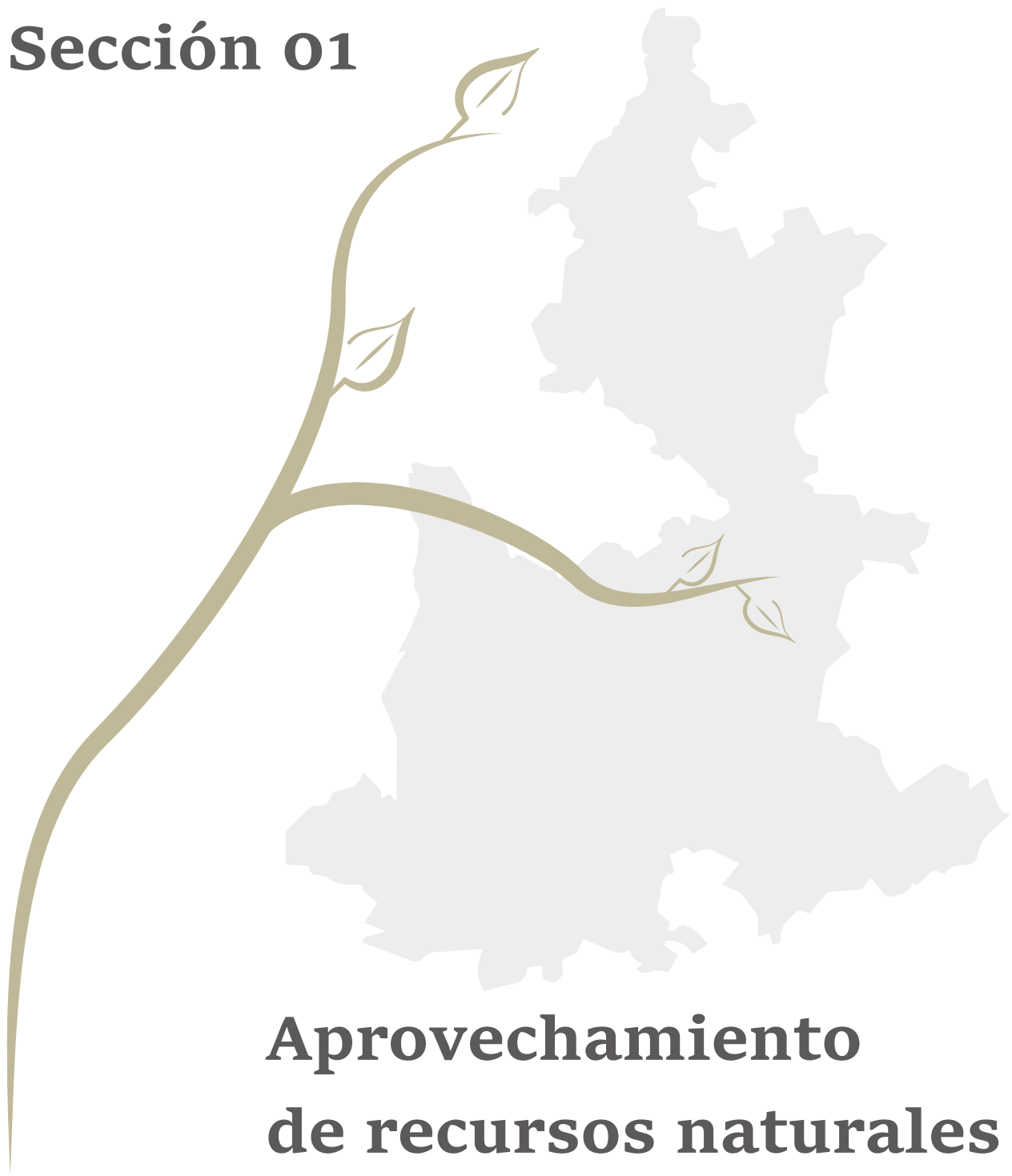


Doctor en Estudios Latinoamericanos en la Universidad Nacional Autónoma de México y en Psicología por parte de la Escuela Libre de Psicología de Puebla. Tiene una maestría en Administración del trabajo donde se desempeñó como becario del gobierno federal en la Universidad Autónoma Metropolitana y es licenciado en Economía por la Universidad Autónoma de Puebla (actualmente Benemérita Universidad Autónoma de Puebla). Cuenta con 42 años de experiencia profesional, como docente e investigador; en economía (licenciatura, maestría y doctorado) en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Universidad Tecnológica de la Mixteca en Huajuapán de León, Universidad Tecnológica de Tecamachalco, Universidad Anáhuac Puebla, Instituto Tecnológico y

de Estudios Superiores de Monterrey y en la Universidad Iberoamericana Puebla. Fundador de la materia de Econometría en la Facultad de Economía de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en 1982 y además es representante académico en Puebla de Academia Journals de San Antonio Texas desde el 2015 a la fecha. El Dr. Covarrubias Salvatori, se incorporó en febrero de 2019 como Director General del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla donde promueve, impulsa, asesora y apoya institucionalmente las humanidades, ciencia, tecnología e innovación en el estado de Puebla.

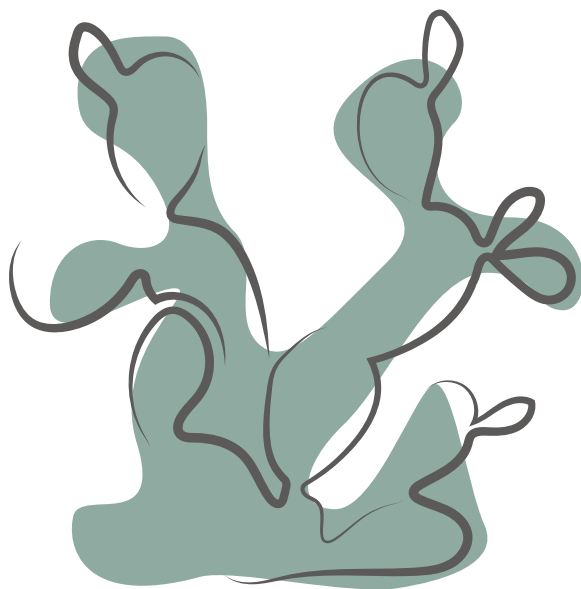


## **Sección 01**



# **Aprovechamiento de recursos naturales**





# Avances y perspectivas de aplicación de biopolímeros naturales en la industria agroalimentaria mexicana

Aguilar-Veloz, Laura Maryoris<sup>1</sup>

Torres-Salinas, Ariana Fabiola<sup>1</sup>

Díaz-Ramos, Dafne Ivette<sup>1</sup>

Brión-Espinoza, Irvin Antonio<sup>1</sup>

Pérez-Orozco, Juan.Pablo<sup>2</sup>

Ortiz Basurto, Rosa Isela<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Posgrado e Investigación, TecNM-Instituto Tecnológico de Tepic, Av. Tecnológico 2595, Lagos del Country, C.P. 63175, Tepic Nayarit, México.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, TecNM-Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico 27, Col. Centro, C.P. 62780, Zacatepec, Morelos, México.

\*Correspondencia:

RIOB <https://orcid.org/0000-0002-8284-4690>  
riobasurt@ittec.edu.mx; (52) 3112242882.

De acuerdo a los principios de la economía circular, el paradigma de desarrollo económico internacional se orienta a la revalorización de residuos y al establecimiento de sistemas horizontales sostenibles. Su implementación en países como México, con una amplia biodiversidad, es una gran oportunidad para el aprovechamiento de recursos naturales y residuos agroindustriales, en función del desarrollo económico del país y el bienestar humano. En este contexto, la obtención de biopolímeros naturales, es una alternativa de desarrollo. Durante la última década la comunidad científica mexicana ha trabajado en la caracterización de nuevos biopolímeros, fundamentalmente polisacáridos y proteínas, a fin de diversificar sus propiedades tecnofuncionales. Los resultados de estas investigaciones han permitido ampliar el espectro de aplicación a escala semindustrial e industrial, gracias al desarrollo de mezclas y/o modificación estructural de biopolímeros, orientadas al desarrollo de nuevos alimentos nutraceuticos, fármacos, biocontrol y/o conservación en postcosecha, cuya base ha sido la obtención de micro y/o nanoestructuras, compósitos funcionalizados de fármacos y otros compuestos de alto valor biológico. El objetivo del presente trabajo fue analizar los avances, retos y perspectivas sobre investigación de biopolímeros naturales (polisacáridos y proteínas) y de extrapolación a la agroindustria nacional.

## Palabras clave

Agroindustria mexicana, biopolímeros naturales, polisacáridos, propiedades tecnofuncionales, proteínas.

## Introducción

México es un país megadiverso, que cuenta con un alto potencial de recursos naturales. A escala mundial, ocupa el cuarto lugar por su riqueza en especies vegetales y el quinto por la diversidad de su flora (Halfiter, 2017). Es el país de origen y de mayor biodiversidad de especies de agave (López *et al.*, 2017). Es el cuarto productor de soya y el quinto de maíz (FAO, 2019). Además, ocupa el séptimo lugar en producción de camarón (Velasco-Reyes *et al.*, 2019). La producción de caña de azúcar supera los 55 millones de ton y es una de las principales fuentes de sustrato para la obtención de bioproductos (SIACON-SAGARPA, 2017).

Sin embargo, las pérdidas de alimentos, la falta de infraestructura para el manejo y aprovechamiento de residuos, afectan el desarrollo agroindustrial. Las perspectivas se vislumbran a través del aprovechamiento de fuentes de energía y materiales renovables, mediante la revalorización de residuos, según los principios de la economía circular (EC) (Carrillo-González y Ponce-Sánchez, 2019). Uno de los pilares de ese paradigma, es la obtención de biopolímeros naturales (BN), a partir de nuevas fuentes o agroresiduos, como opción innovadora de producción de alimentos y otros productos de interés económico (Silva *et al.*, 2020).

Las investigaciones sobre BN parten de la diversidad de mecanismos de acción biológica y propiedades tecnofuncionales (PTF). Su disponibilidad, biocompatibilidad, biodegradabilidad, estabilidad, capacidad de carga, cinética de liberación e inocuidad, justifican el desarrollo de tecnologías e innovación. La formulación de mezclas y la modificación estructural, constituyen alternativas para mejorar las PTF y diversificar las aplicaciones como materiales de encapsulación de compuestos de alto valor biológico (CAVB), agentes de biocontrol, mucoadhesivos, espesantes, emulsificantes, espumantes, entre otros, para la formulación de alimentos, fármacos y nutraceuticos (López-Franco *et al.*, 2021). Sobre esta base, el objetivo del trabajo fue analizar los avances y retos de la comunidad científica mexicana, en la investigación de polisacáridos y proteínas.

### 1. Principales biopolímeros naturales: fuentes de obtención y propiedades tecnofuncionales

Las PTF de los BN (solubilidad, capacidad espesante, espumante, gelificante, grado de hinchamiento, efecto quelante, antimicrobiano, fotoprotector, coadyuvante, prebiótico e inmunoestimulante, entre otros) dependen de sus características estructurales (masa molecular- MM, grado de polimerización- GP, grado de sustitución- GS) y de las condiciones ambientales (disolvente, fuerza iónica, pH, temperatura, presencia de otras sustancias) (López-Franco *et al.*, 2021).

Según su origen, los BN de mayor interés comercial constituyen polisacáridos, proteínas y lípidos, de procedencia animal, vegetal y microbiana (Silva *et al.*, 2020). A continuación, se profundizará en los polisacáridos (gomas, mucílagos y otros polisacáridos) y proteínas (animal y vegetal) más estudiados recientemente por investigadores mexicanos.

Las gomas se destacan por su capacidad de alterar el comportamiento reológico de soluciones acuosas, al variar las características de flujo y formar geles. Entre las más investigadas se destacan la goma de mezquite (*Prosopis* spp. L.) y pectinas (Macías-Cortés *et al.*, 2020) (TABLA I).

## 1.1 Polisacáridos

### 1.1.1 Gomas

**Goma mezquite (GM).** El árbol es nativo de zonas áridas y semiáridas de México (Rodríguez-Sauceda *et al.*, 2014). La GM por sus características estructurales, constituye un hidrocoloide excepcional (TABLA I). Se ha usado para obtener películas y recubrimientos comestibles y como material de pared estabilizante para la microencapsulación de CAVB. Moreno-Trejo y Sánchez-Domínguez (2016), sintetizaron nanopartículas de plata de extractos polifenólicos con rendimientos de 95 %, estables por más de tres meses. Por su parte, Cortés-Camargo *et al.* (2018, 2019) evidenciaron el efecto sinérgico de mezclas de GM con mucílago de nopal y chía, para mejorar las PTF y extender la vida útil de CAVB en secado por aspersión.

La goma forma complejos electrostáticos insolubles con lipoproteínas en alimentos reducidos en colesterol (Villarreal *et al.*, 2018). Se ha empleado para sustituir gluten en productos de panadería (González-Montemayor *et al.*, 2019). Debido a su potencial de aplicación, es una posible fuente de ingresos para las regiones áridas de México, donde aún se desvaloriza.

**Las pectinas (PC).** Son heteropolisacáridos de la pared celular de las plantas, de estructura compleja (TABLA I). La esterificación con metilo define su poder gelificante bajo el efecto del pH, temperatura y concentración de iones. Las PC de alto metoxilo (PAM), con un grado de esterificación alrededor del 80 %, se utilizan en elaboración de alimentos por su estabilidad a pH bajos y su capacidad de sustitución de grasas, mientras que las de bajo metoxilo (PBM), se emplean con sales de calcio, como espesantes, durante congelación-descongelación y en películas protectoras en diferentes alimentos (Lara-Espinoza *et al.*, 2018).

Se han empleado satisfactoriamente en la formulación de matrices de encapsulación de CAVB, moléculas terapéuticas o células, en mezclas con otros BN. García-Saldaña *et al.* (2016) evaluaron el efecto de PC/gelatina y goma arábica/gelatina/PC para estabilizar sulfuran un compuesto empleado en quimioterapias. La mayor eficiencia de encapsulación (17.91 %) se alcanzó con PC/gelatina, con rendimientos mayores a 80 %. Rascón-Chu *et al.* (2018) lograron microcápsulas de insulina a base de PC y arabinoxilanos, por electroaspersión y gelificación iónica. Recientemente, Jiménez-Maldonado *et al.* (2018) evidenciaron el efecto elicitor de fragmentos del ramnogalacturonano II en jitomate, resultado de interés para aplicaciones en poscosecha.

### 1.1.2 Mucílagos

Los “nuevos polisacáridos”, se extraen principalmente del nopal (*Opuntia ficus indica*) (MN), sábila (*Aloe vera* L., Burm) (MAV), chía (*Salvia hispanica* L.) (MCh) y plantago (*Plantago psyllium* L.) (MP) (TABLA I). Por sus características estructurales, modifican las propiedades físico-químicas de las dispersiones, en dependencia del método de secado empleado (Macías-Cortés *et al.*, 2020).

Tabla 1. Principales polisacáridos estudiados por investigadores de la comunidad científica mexicana entre 2010-2020

| Biopolímero                    | Fuente de obtención                                                  | Características estructurales                                                                                                                                                                                                                                                          | Propiedad tecnofuncional                                                                                                    |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gomas                          |                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                             |
| Goma mezquite                  | Mezquite ( <i>Prosopis laevis</i> (Humb. & Bonpl. ex Willd.))        | Arabinogalactano aniónico de D-galactosa $\beta$ (1 $\rightarrow$ 3) y $\beta$ (1 $\rightarrow$ 6), L-arabinosa, ácido D-glucurónico, ácido 4-O-metil-glucurónico y proteína (2-4.8 %), MM de 2- 12 MDa                                                                                | Encapsulante, gelificante, estabilizante de espumas, emulsiones y dispersiones                                              |
| Pectinas                       | Cítricos ( <i>Citrus L.</i> ), plantas dicotiledóneas, agro residuos | Polianión de MM de 50- 705 kDa, con cadena lineal de homogalacturonano (65 %), residuos de ácido galacturónico ( $\alpha$ 1-4), metil- o acetil-terificados) y ramnogalacturonano (RGI) (20-30 %), ramificada con RGII (1-8 %) (xilogalacturonanos, arabinogalactanos, entre otros)    | Gelificante, emulsionante, encapsulante, prebiótico                                                                         |
| Mucílagos                      |                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                             |
| Mucílago de nopal              | Nopal ( <i>Opuntia ficus indica</i> (L.) Mill)                       | Polianión ramificado, MM entre 3-4.3 x 10 <sup>6</sup> Da, de L-arabinosa (35-40 %), D-xilosa (20-25 %), D-galactosa (20-25 %), L-ramnosa (7-8 %) y ácido D-galacturónico (5-8 %)                                                                                                      | Gelificante, espumante, emulsionante, encapsulante                                                                          |
| Mucílago de Aloe vera          | Sábila (Aloe vera L.)                                                | Acemananos acetilados (manosa, glucosa y galactosa) (50 %), celulosa (25 %), pectina (20 %), MM hasta de 520 kD.                                                                                                                                                                       | Encapsulante, termoprotector, inmunoestimulante                                                                             |
| Mucílago de chía               | Chía ( <i>Salvia hispanica</i> L.)                                   | Tetrasacárido aniónico de (1-4)- $\beta$ -D-xilopiranosilo-(1-4)- $\beta$ -D-glucopiranosilo-(1-4)- $\beta$ -D-xilopiranosilo, residuos de 4-O-metil- $\alpha$ -D-glucuronopiranosilo y ramificaciones de $\beta$ -D-xilopiranosilos. MM- 3.13x10 <sup>4</sup> - 1.0 x 10 <sup>6</sup> | Encapsulante, gelificante, termoprotector                                                                                   |
| Mucílago de plantago           | Semillas de Plantago ( <i>Plantago psyllium</i> L.)                  | Arabinosilano aniónico de D-xilosa (22.6 %) y L-arabinosa (74.6 %), D-ácido galacturónico, ramnosa, proteína (15-18 %) y trazas de alcaloides, fitosteroles, oligoelementos, sales de potasio, entre otros (5-10 %).                                                                   | Gelificante, prebiótico                                                                                                     |
| Otros polisacáridos            |                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                             |
| Fructanos (gramíneos/agavinas) | Agaves ( <i>Agave tequilana</i> W.)                                  | Mezcla de FOS obtenidos por hidrólisis enzimática de FAAGP, con enlaces $\beta$ - (2-1) fructosil-fructosa y $\beta$ (2-6) con cadenas ramificadas, GP de 3 a >30 unidades de fructosa y MM de 3600-11 000 Da                                                                          | Sustituto de grasas, prebiótico, estabilizante de espumas y fibras, encapsulante, humectante, lio- protector, fotoprotector |
| Maltodextrinas                 | Almidón de papa ( <i>Solanum tuberosum</i> L.)                       | Polímeros de D-glucosa de GP heterogéneo (DE 10- 30). MM hasta 500 g/mol                                                                                                                                                                                                               | Alta solubilidad, agente de secado, poder edulcorante                                                                       |
| Quitano                        | Exoesqueleto de crustáceos ( <i>Crustacea</i> )                      | Polimerización lineal, parcialmente acetilado (>50 %), de $\beta$ -(1-4) D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina desacetilada, MM- 50-550 kD.                                                                                                                                           | Encapsulante, gelificante, matriz de inmovilización, agente quelante y antimicrobiano                                       |
| AX                             | Derivados de maíz ( <i>Zea mays</i> L.) y residuos industriales      | Polianión lineal de xilosa $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4), arabinosa $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 3), $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 2), ácido glucurónico y galactosa, esterificados por O-5 con AF; MM- 124- 270 kDa.                                                                        | Solubilidad variable en agua, prebiótico, fibra antioxidante, gelificante, encapsulante                                     |

Dado el potencial del MN, se han desarrollado metodologías locales de extracción (Galicia-Villanueva *et al.*, 2017). Con el fin de diversificar sus PTF, se estudiaron mezclas GM-MN, demostrándose que el incremento de concentración aumentó la viscosidad de las emulsiones y el tamaño de partículas, así como la eficiencia de encapsulación y estabilidad oxidativa de compuestos (Cortés-Camargo *et al.*, 2018).

Por su parte, el MAV, actúa como estabilizante para diferentes CAVB (Medina-Torres *et al.*, 2019). La combinación con otros BN favorece su potencial para conservar la viabilidad y liberación de bacterias ácido lácticas como *Lactobacillus plantarum*, manteniendo un 70 % de sobrevivencia en secado por aspersión con mezclas de MAV-fructanos de agave (Cejas-Medina *et al.*, 2021).

El MCh (*Salvia hispanica* L.) por su contenido de carbohidratos y su solubilidad, favoreció la encapsulación de curcumina (Álvares-Monge-Neto *et al.*, 2017). Las mezclas de GM-MCh favorecieron la estabilidad de aceite esencial de limón, con una eficiencia de 98.3 a 98.6 % (Cortés-Camargo *et al.*, 2019).

El MP extraído de las semillas de *Plantago psyllium* es un material fibroso, con proteínas y trazas de otros compuestos, como la aucubina, glicósido hepatoprotector (Álvares-Monge-Neto *et al.*, 2017). En productos de panadería, la adición de semillas molidas de *P. psyllium* y *P. ovata* aumentó significativamente la producción de masa, al aumentar la absorción de agua y reducir el pH; y mejoró la textura de la miga y su elasticidad en 40 % (Ziemichód *et al.*, 2019).

### 1.1.3 Otros polisacáridos

**Fructanos de Agave (FA).** Son carbohidratos derivados de sacarosa, presentes en plantas superiores, como reserva energética, estructural y de protección y en algunos microorganismos (Matros *et al.*, 2019). Se clasifican como fibra prebiótica hidrosoluble en fructooligosacáridos (FOS) (GP 3–9) y fructanos (GP ≥ 10) (Mellado-Mojica y López, 2012). Por sus PTF, superan a la inulina en solubilidad, incluso en concentraciones mayores al 25 % (TABLA 1). Se ha confirmado además, su efecto prebiótico, en dependencia del GP y fuente de origen (García-Gamboa *et al.*, 2020).

En cuanto a las aplicaciones tecnológicas, durante secado por aspersión, fracciones de FA de *A. tequilana*, de diferente GP, actuaron como agentes lioprotectores de proteína de plasma bovino y aseguraron mayor tiempo de vida de anaquel (Rodríguez-Furlán *et al.*, 2014). En la microencapsulación de pitanga (*Eugenia uniflora* L.), fracciones de alto (FAAGP) y medio GP (FAMGP) utilizadas en una relación 1:6 (núcleo: material de pared), brindaron un efecto protector y prebiótico (Ortiz-Basurto *et al.*, 2017). En la preparación de polvos de chayote y piña secados por aspersión, la adición de FA, contribuyó a la disminución significativa de la fracción de MD (DE 10, 10 %), a mejorar la solubilidad y estabilidad de los polvos (Jimenez-Sánchez *et al.*, 2018). Posteriormente, con el uso de electroaspersión, se demostró la factibilidad de encapsular β-caroteno con 30 % de FAAGP, obteniendo partículas estables a la luz ultravioleta hasta 50 h (Ramos-Hernández *et al.*, 2018).

Actualmente, el estudio de diversas especies sustenta la economía del cultivo de *A. tequilana* y su extensión, con el fin de asegurar la producción de FA. Aldrete-Herrera *et al.* (2019) reportaron los perfiles de FA de siete especies con el fin de identificar las candidatas para la producción de FAAGP (mayor a 40), FAMGP (medio, de 10-30) y FABGP (de 3-9), a emplear en la encapsulación de CAVB.



**Maltodextrinas (MD).** A escala industrial se producen principalmente por hidrólisis enzimática del almidón de papa. Poseen una composición heterogénea por el GP de las cadenas glucosídicas (equivalente de dextrosa, ED) (*TABLA I*) y grado de ramificación, por lo que, moléculas con un mismo valor de ED poseen diferentes propiedades físico-químicas y PTF (Vicuña-Galindo *et al.*, 2020). Aunque no son considerados polímeros inteligentes, son muy utilizados como agentes de secado, por su efectividad y bajo costo, fundamentalmente las de ED >10. Medina-Torres *et al.* (2016) utilizaron MD para microencapsular infusiones de laurel (*Litsea glaucescens*), obteniendo partículas homogéneas con 10.2 a 20.2 mg GAE/g y una eficiencia de encapsulación de 70 %. La combinación con otros BN permite diversificar sus PTF (Macías-Cortés *et al.*, 2020).

**Quitosano (Qt).** Es un copolímero lineal parcialmente acetilado (>50 %), obtenido de la quitina, principalmente del exoesqueleto de camarón (Velasco-Reyes *et al.*, 2019) (*TABLA I*). Recientemente, México produjo 47 mil 664 ton de camarón (Conapesca, 2020), equivalentes a más de 4 mil ton del biopolímero, lo que favorece la revalorización del residuo y la reducción de su efecto contaminante.

En su condición de polielectrolito, el Qt se caracteriza por su capacidad de interaccionar con otros BN, por lo que tiene un amplio espectro de aplicaciones, en películas, recubrimientos, cápsulas y fibras, entre otros (Hernández-Téllez *et al.*, 2016). Las propiedades fisicoquímicas dependen de su composición (grupos amino y acetilo), características estructurales (grado de acetilación, MM, GP) y concentración. El pH influye significativamente en su solubilidad, porque alrededor de pH 5.6 los grupos aminos libres se protonizan. Por ejemplo, en emulsiones con GM, mejora la estabilidad de emulsiones O/W y W/O/W mediante el incremento de la capacidad de adsorción en la interfase agua-aceite y el carácter viscoelástico de la película absorbida (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2019).

El Qt ha sido muy estudiado por su efecto antimicrobiano contra patógenos (Bautista-Baños *et al.*, 2017). Por ejemplo, Sotelo-Boyás *et al.* (2015) obtuvieron nanopartículas de aceites esenciales con Qt, que favorecieron el efecto inhibitorio *in vitro* contra *Pectobacterium carotovorum*.

**Arabinosilanos (AX).** Son los principales polisacáridos no amiláceos en cereales, otros materiales vegetales y agro-residuos (Márquez-Escalante *et al.*, 2015). En dependencia de las fuentes de origen y los métodos de extracción, es un grupo heterogéneo en estructura y propiedades de fibra antioxidante (*TABLA I*). A expensas de derivados de AF (hasta 85 %) y bajo la acción de agentes químicos oxidantes o enzimáticos, se forman hidrogeles de AX, covalentes, biocompatibles y estables a cambios de temperatura, fuerza iónica y pH, con diferente capacidad de hinchamiento y liberación controlada (Morales-Ortega *et al.*, 2013). Geles de hasta 2 % han favorecido la formación de microesferas con 10 % de proteína (Tapia-Hernández *et al.* (2015). Posteriormente, Rascón-Chu *et al.* (2018) formularon microesferas de AX y PBM, para la administración oral de insulina dirigida al colon. Se han demostrado, además, las potencialidades de las películas de AX para entrapar microorganismos, como *Bifidobacterium* (Paz-Samaniego *et al.*, 2016) y *Debaryomyces hansenii* (González-Estrada *et al.*, 2017).

Recientemente, Carvajal-Millan *et al.* (2020) evidenciaron que los AX y sus geles, además de actuar como prebióticos, favorecen el equilibrio de Bacteroidetes/Firmicutes, importantes para prevenir la obesidad.



## 1.2 Proteínas

Las principales propiedades funcionales de las proteínas se deben a la composición aminoacídica (TABLA 2). Hasta el momento, las más utilizadas han sido de origen animal, con abundancia en lisina, treonina, triptófano y/o aminoácidos azufrados (Higuera-Ciapara y Lugo-Cervantes, 2017). Sin embargo, en la última década, se observa un creciente interés por proteínas de origen vegetal, sobre la base de su disponibilidad y de sus PTF (Tapia-Hernández *et al.*, 2019).

### 1.2.1 Proteínas de origen animal

Entre las proteínas de origen animal se destacan la “proteína láctea” (PL) y la ovoalbúmina (OA) (TABLA 2). La proteína de la leche es una combinación de fracciones proteicas y se clasifican en: proteínas del suero (lactoalbúmina (LA) y lactoferrina (Lf) y la caseína (Cs) (Layman *et al.*, 2018).

**Proteínas del suero.** La LA se caracteriza por una gran afinidad por el calcio y otros minerales. Su importancia radica en su calidad nutricional, por la variedad de aminoácidos esenciales (Layman *et al.*, 2018). Ha sido empleada como material de pared para encapsular cafeína (Fuciños *et al.*, 2017). Por su parte, la Lf es una glicoproteína (TABLA 2), con propiedades prebióticas, al favorecer el establecimiento de bifidobacterias en el intestino. Además, juega un papel importante en la homeostasis del hierro y posee un efecto antianémico y antidiarreico (Siqueiros-Cendón *et al.*, 2014).

Tabla 2. Principales proteínas estudiadas por investigadores de la comunidad científica mexicana entre 2010-2020

| Biopolímero      | Fuente de obtención           | Características estructurales                                                                                                                                                           | Propiedad tecnofuncional                                                   |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Origen animal    |                               |                                                                                                                                                                                         |                                                                            |
| Lactoalbúmina    | Leche de vaca                 | MM 36 kDa, punto isoeléctrico a pH 4.8, alto contenido de aminoácidos esenciales y cadena ramificada                                                                                    | Gelificante, emulsificante, absorbente, encapsulante                       |
| Lactoferrina     |                               | Glicoproteína de cadena simple, plegada en 2 lóbulos globulares (N y C), conectados por una hélice, unida a hierro, MM 80 kDa, punto isoeléctrico a pH 8.7                              | Antiinflamatoria, antioxidante, antimicrobiana, antiviral, prebiótica      |
| Caseína          |                               | MM 25 kDa y punto isoeléctrico de pH 4.6, contiene todos los aminoácidos esenciales                                                                                                     | Gelificante, emulsificante, absorbente                                     |
| Ovoalbúmina      | Clara de huevo                | Fosfoglicoproteína con fracciones, A1, A2 y A3 (85:12:3), 386 residuos de aminoácidos; 4 grupos tiol libres en su núcleo, con un puente disulfuro MM 45 kDa, punto isoeléctrico a pH 5. | Espumante, emulsionante, gelificante, alta absorción de agua y solubilidad |
| Origen vegetal   |                               |                                                                                                                                                                                         |                                                                            |
| Proteína de soya | Soya ( <i>Glycine max</i> L.) | 2 subunidades de composición y estructura diferentes: $\beta$ -conglucina (7S), MM 150-200 kDa y glicina (11S), MM 300-380 kDa y punto isoeléctrico a pH 4.5-4.8-                       | Espumante, emulsificante y encapsulante                                    |

|                      |                                                  |                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                      |
|----------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Proteína de amaranto | Amaranto ( <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L.) | Amarantina (globulina 11S) con alto contenido de aminoácidos esenciales (fundamentalmente lisina) 2 grupos disulfuros y 2 subunidades (básica y ácida), que confieren termoestabilidad, MM de 398 kDa, punto isoeléctrico a pH 5.0          | Alta retención de agua y aceite, gelificante, antioxidante, emulsificante, espumante |
| Ceína                | Maíz ( <i>Zea mays</i> L.)                       | Según MM, existen 4 tipos diferentes de ceína y estructura: $\alpha$ (entre 22 y 24 kDa), $\beta$ (17 kDa), $\gamma$ (10 kDa) y $\delta$ (con dos subunidades de 27 y 18 kDa) y naturaleza hidrofóbica, con punto isoeléctrico a pH 5.5-6.5 | Encapsulante, antioxidante                                                           |

**Caseína (Cs).** Representa el 80 % de las proteínas lácteas. Contribuye al transporte de calcio, fósforo y aminoácidos esenciales; es fuente de vitaminas A, B1 y B12. Dada sus PTF (TABLA 2), ha aumentado el interés por su aplicación como agente encapsulante. Artegoitia *et al.* (2015) demostraron el uso de Cs y de sus hidrolizados como excipientes de cianocobalamina. Jain *et al.* (2016) lograron encapsular  $\beta$ -caroteno por coacervación, con mezclas de Cs y goma tragacanto. Se ha trabajado en mejorar su solubilidad en agua, mediante mezclas con FA (Sosa-Herrera *et al.*, 2016). Además, se ha usado para la formulación de suplementos y preparación de alimentos, como el requesón (Ramírez-Rivas y Chávez-Martínez, 2017).

**Ovoalbúmina (OA).** Es una de las proteínas con mayor calidad, representa un 54 % del total de proteínas de la clara de huevo (TABLA 2). Por sus PTF tiene amplio uso en la industria alimentaria, biofarmacéutica y nutracéutica. Se ha demostrado el efecto de las condiciones de procesamiento y la formación de mezclas con otros BN, sobre sus PTF (Macías-Cortés *et al.*, 2020).

Con el fin de proteger catequinas del té (*Camellia sinensis*), se elaboró un complejo OA-antioxidantes, que puede usarse como aditivo en alimentos funcionales. A distintos valores de pH, se evaluó el método de gelación iónica. A pH 4 se obtuvo un 75 % de encapsulación, mientras que con 0.5 % p/v de proteína se maximizó la eficiencia del proceso (Gallegos-Garza *et al.*, 2017). Recientemente, se estudiaron los mecanismos moleculares de formación de espumas del complejo OA-pululano (Sheng *et al.*, 2020), así como las propiedades inmunomoduladoras y anticancerígenas del complejo OA-selenio (Sun *et al.*, 2020).

### 1.2.2 Proteínas de origen vegetal

**Proteína de Soya (PS).** El residuo de soya es un subproducto rico en fibra dietética y proteínas, con altos niveles de aminoácidos esenciales (TABLA 2). En México, la PS se usa para mejorar el valor nutricional de diferentes alimentos. Por ejemplo, en tortillas, Montemayor-Mora *et al.* (2018) demostraron que la adición de PS al 10 % constituye una excelente alternativa para sustituir la harina de trigo refinada. Su uso mejora las propiedades reológicas, textura, dimensiones, color, contenido de proteínas (9.3 %) de la masa y fibra dietética de las tortillas.

Por su parte, Torres *et al.* (2019) demostraron los mecanismos moleculares de la acción de PS, como reductor de lipotoxicidad y mejorador del microbioma.

**Proteína de amaranto (PA).** *Amaranthus hypochondriacus* es una planta tradicional mexicana, con granos y hojas de alto valor nutritivo. Las semillas destacan por su contenido en base seca de proteína (14 y 18 %), superior al de la mayoría de los cereales y de lípidos (de 7 a 8 %), de los cuales el escualeno constituye un potente antioxidante (Matías *et al.*, 2018). Entre las fracciones proteicas, la amarantina

(globulina 11S) es la predominante (TABLA 2), con un alto valor nutricional (García-Fillería, 2019).

La PA se ha investigado por su capacidad como agente encapsulante de CAVB en mezclas con otros BN, como pululano, obteniéndose microfibras electro-estiradas, de ácido fólico y quercetina (Aceituno-Medina *et al.*, 2015), estables y con un comportamiento satisfactorio de liberación controlada. En cuanto a su acción metabólica, Suárez *et al.* (2020) evidenciaron el efecto hipotensor de la mezcla de PA y sus péptidos en ratas, lo que justifica su uso en formulaciones para hipertensos. De igual manera, Figueroa-Basurto (2019) reportó la utilidad de mezclas de PA y proteínas de frijol lima, para reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares, por la acción de gluteninas, resultado que ha permitido su introducción en alimentos funcionales.

**Ceína (CI).** En la última década, la CI ha sido la proteína más estudiada del maíz (*Zea mays L.*), por su composición y naturaleza hidrofóbica (TABLA 2). Se destaca por su capacidad de autoensamblaje en diferentes portadores, alta capacidad de carga, liberación sostenida, resistencia a las enzimas digestivas y resistencia mecánica en condiciones de alta humedad, además de ser biodegradable y biocompatible (Labib, 2018).

Se ha investigado su capacidad para formar encapsulados, micro/nanopartículas, fibras, micelas, entre otros, por garantizar estabilidad al calor y la humedad y mitigar la oxidación. Lee *et al.* (2016) utilizaron CI para proteger la superóxido dismutasa, mediante la formación de nanopartículas, mientras que, Gómez-Mascaraque *et al.* (2017) reportaron su uso satisfactorio en la microencapsulación de catequinas del té verde.

## 2. Experiencias en modificación estructural de polisacáridos y proteínas

En dependencia de sus condiciones de obtención, almacenamiento y aplicaciones, los BN pueden sufrir cambios estructurales, que varían sus características fisicoquímicas. Sin embargo, su transformación de forma dirigida por métodos físicos, químicos y enzimáticos, garantiza nuevas PTF (Silva *et al.*, 2020). En la FIGURA 1 se consideran los factores, que influyen en los cambios fisicoquímicos de BN. A pesar de que no ha sido una línea muy abordada en México, los resultados demuestran sus perspectivas para diversificar las aplicaciones de los BN (TABLA 3).

### 2.1 Polisacáridos modificados

Los trabajos se han orientado fundamentalmente a la modificación de PC, FA, Qt y AX (TABLA 3). En el caso de las PC, la desesterificación de grupos metilos, favorece la obtención de fracciones con mejores propiedades gelificantes y capacidad de encapsulación (Lara-Espinoza *et al.*, 2018) (TABLA 4). No obstante, su sensibilidad a pH resulta un inconveniente para su aplicación. Con el objetivo de mejorar este comportamiento, Cornejo-Ramírez *et al.* (2019) evaluaron el efecto de la inserción de metacrilato en la estructura de PBM sobre su capacidad gelificante a diferentes pH. Los geles obtenidos con PC, 3 % (m/v), 10 mM CaCl<sub>2</sub>, fotoreticulados con 10 % (m/v) Irgacure™ y con albúmina sérica bovina incorporada, a pH 1.5 mostraron un coeficiente de difusión mayor; mientras que, a pH neutro, los geles modificados fueron más porosos y 2.46 % más fuertes, con mejor capacidad de liberación controlada y mayor estabilidad.

Los trabajos de modificación con FA, han estado orientados a reducir su higroscopicidad. Casas-Godoy *et al.* (2016) demostraron las propiedades emulsionantes (agua/aceite) de ésteres de ácidos grasos y FA sintetizados por acilación enzimática, con diferentes GP, al utilizar lipasas comerciales inmovilizadas y vinil laurato. Miramontes-Corona *et al.* (2020) caracterizaron la liberación enzimática del ibuprofeno a partir de FA esterificados con grupos acetilo, lauroilo y palmitoilo, en condiciones de colon simulado y demostraron que la eficiencia de encapsulación aumentó de 0.8 % (FA no modificado) a 17 o 21.5 % (FA esterificado). Recientemente, mediante reacción de acilación con ácido láurico, Ignot-Gutiérrez *et al.* (2020) demostraron que los FA modificados presentaron valores de solubilidad, capacidad de hinchamiento, actividad emulsionante y capacidad de espuma superiores.

**Tabla 3. Modificaciones estructurales de algunos BN desarrolladas por grupos de investigadores mexicanos (2010-2020)**

| Tipo de modificación | Biopolímero                      | Efecto atribuido a la modificación                                                                                                       | Referencia                             |
|----------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Polisacáridos</b> |                                  |                                                                                                                                          |                                        |
| Química              | Pectina                          | Mejora de propiedades gelificantes, por disminución de grupos hidroxilos                                                                 | Rascón-Chu <i>et al.</i> (2018)        |
|                      |                                  | Mejora en estabilidad y liberación controlada de geles, dependiente del pH, por injerto de grupos metacrílicos                           | Cornejo-Ramírez <i>et al.</i> (2019)   |
|                      | Fructanos de tipo inulina        | Formación de un sistema redox mediante reacción de injerto de ácido inúlico-gálico                                                       | Arizmendi-Cotero <i>et al.</i> (2016)  |
|                      | Fructanos de <i>A. tequilana</i> | Mejora de hidrofobicidad de microesferas, estables al pH gástrico, por esterificación con grupos acetilo y palmitoilo.                   | Miramontes-Corona <i>et al.</i> (2020) |
|                      |                                  | Mejora de solubilidad, capacidad emulsionante, espumante y de estabilidad por acetilación, en dependencia del pH                         | Ignot-Gutiérrez <i>et al.</i> (2020)   |
|                      | Quitosano                        | Mejora de eficiencia de encapsulación por gelificación ionotrópica                                                                       | Velasco-Rodríguez <i>et al.</i> (2012) |
| Enzimática           | Fructanos de <i>A. tequilana</i> | Mejora de propiedades emulsionantes (agua/aceite) de ésteres de ácidos grasos por acilación enzimática                                   | Casas-Godoy <i>et al.</i> (2016)       |
|                      | Quitosano                        | Mejora de propiedades antioxidantes y newtonianas de las dispersiones, por inserción de cadenas laterales de alquilo                     | Zavaleta-Avejar <i>et al.</i> (2014)   |
|                      | Arabinosilanos                   | Incremento de propiedades gelificantes por oxidación con lacasas                                                                         | Morales-Ortega, <i>et al.</i> (2013)   |
| <b>Proteínas</b>     |                                  |                                                                                                                                          |                                        |
| Química              | Ovoalbúmina                      | Mejora de solubilidad por esterificación, oxidación y alquilación                                                                        | Macías-Cortés <i>et al.</i> (2020)     |
| Química              | Proteína de soya y de maní       | Mejora de propiedades emulsionantes y digestibilidad por fosforilación                                                                   | Sánchez-Reséndiz <i>et al.</i> (2018)  |
| Enzimática           | Proteína de leche                | Cambios en secuencias peptídicas con mayor capacidad para fijar hierro y calcio, por fermentación con <i>Lactococcus lactis</i> NCFB 712 | Figuroa-Hernández <i>et al.</i> (2012) |
| Física               |                                  | Reducción de sinéresis de geles y aumento de capacidad de retención de agua por aplicación de ultrasonido                                | Higuera-Barraza <i>et al.</i> (2016)   |

El Qt ha sido modificado con el fin de aumentar su solubilidad, hidrofobicidad, resistencia mecánica, térmica a pH extremos, por métodos químicos y enzimáticos. Velasco-Rodriguez *et al.* (2012) mejoraron la capacidad de gelificación, de hinchamiento y eficiencia de encapsulación del ácido  $\alpha$ -lipóico, mediante entrecruzamiento ionotrópico con derivados de fosfato de sodio.

Por su parte, Zavaleta-Avejar *et al.* (2014) demostraron que la inserción de cadenas laterales hidrófobas de alquilo al Qt, usando galato de octilo y peroxidasa de rábano, mejoró la capacidad antioxidante. Las dispersiones de los materiales en ácido acético y láctico incrementaron el comportamiento de adelgazamiento al cizallamiento y disminuyeron su elasticidad. En mezclas con poli-(vinil alcohol) es posible incrementar la capacidad absorbente y de quelación del Qt para Cu (II) y Zn (II) (Flores-Álamo *et al.*, 2015).

Arabinosilanos (AX). Los estudios se han enfocado fundamentalmente a la formación y caracterización de geles covalentes, obtenidos por reacciones con lacasas por fracciones de AX (Morales-Ortega, *et al.*, 2013).

## 2.2 Proteínas modificadas

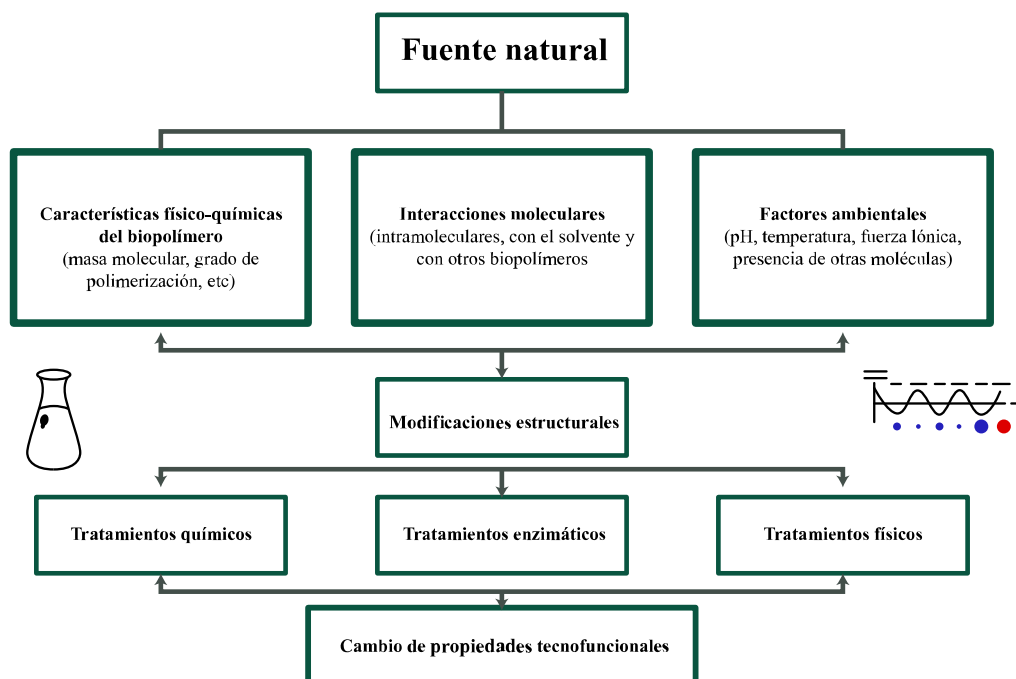
Los trabajos de modificación estructural de proteínas en el contexto mexicano se han reportado principalmente en PS, con el fin de mejorar su capacidad emulsionante y digestibilidad (TABLA 3). Sánchez-Reséndiz *et al.* (2018) estudiaron el efecto de la fosforilación con trimetafosfato sódico de aislados de PS y proteína de maní, a diferentes valores de concentración, pH, temperatura y tiempo. El mayor grado de fosforilación se alcanzó con 2 % del compuesto a pH 12.5. Ambas proteínas modificadas mejoraron su actividad emulsionante en 27.3 y 6.6 %, respectivamente y su digestibilidad *in vitro*.

A nivel internacional, los trabajos se orientan a mejorar las propiedades de hidrolizados de PS, para desarrollar nuevos agentes espumantes. Liang *et al.* (2020) incrementaron la capacidad espumante y estabilidad al combinar tratamientos térmico y enzimático con pepsina. De igual manera, Ruan *et al.* (2020) mejoraron las propiedades espumantes y estabilidad de la PS en mezclas con ramnolípidos.

Actualmente, se presta gran atención a la caracterización de hidrolizados proteicos y biopéptidos, de diferentes fuentes de origen animal y vegetal, mediante el uso de proteasas (Tapia-Hernández *et al.*, 2019). Los hidrolizados cuentan con propiedades emulsionantes, mientras que los péptidos, sobre la base de su composición aminoacídica, secuencia, hidrofobicidad y longitud, además de tener propiedades nutricionales, poseen acción antimicrobiana, antioxidante, antihipertensiva, entre otras, de interés para desarrollar alimentos funcionales, fármacos y productos de biocontrol (Higuera-Ciapara y Lugo-Cervantes, 2017).

En general, ha prevalecido el uso de tratamientos químicos y enzimáticos con el fin de diversificar las PTF. Recientemente, se observa una tendencia al uso de métodos físicos emergentes, como el ultrasonido de alta energía (US), en tratamientos de proteínas de leche, huevo, soya y aves. Su implementación depende de las características de los biopolímeros, pH, fuerza iónica y parámetros operacionales (Higuera-Barraza *et al.*, 2016).

Figura 1. Factores a considerar para diversificar las PTF de polisacáridos y proteínas



### 3. Retos de la agroindustria mexicana en investigación sobre biopolímeros naturales

Sobre la base del arsenal en biorecursos y las potencialidades en ciencia y tecnología en México, la producción de BN es un detonante para el crecimiento de la agroindustria, por lo que es imprescindible identificar y fortalecer las líneas de investigación que potencien su estudio y aplicaciones, sobre todo a partir de fuentes endémicas y renovables. La industria mexicana tiene el reto de asegurar tecnológicamente el manejo y aprovechamiento de grandes volúmenes de agroresiduos (FAO, 2019). Ello implica el desarrollo de programas agrícolas a nivel local, regional y nacional sobre la base de cultivos viables y el rediseño de estrategias de vinculación con la industria. Para ello, es necesario asegurar el apoyo a los productores primarios, en aspectos de capacitación y creación de infraestructuras.

En cuanto a los materiales, se necesitan diversificar las investigaciones sobre proteínas de origen vegetal, como las prolaminas, presentes en cereales y residuos industriales, por sus potencialidades como agentes de encapsulación y sustrato para la obtención de péptidos funcionales, con aplicaciones en la agroindustria y la medicina (Tapia-Hernández *et al.*, 2019). Por otra parte, se necesita impulsar el estudio del efecto de los métodos emergentes sobre las PTF de los biopolímeros (Téllez-Morales *et al.*, 2020). El desarrollo de BN debe enfocarse, además, a la elaboración de empaques inteligentes y biodegradables. Para un desarrollo tecnológico exitoso se propone la implementación de biorrefinerías polivalentes, acompañadas de la evaluación de su factibilidad, según costo de materiales, sostenibilidad energética e impacto ambiental, teniendo en cuenta los principios de la EC (Carrillo-González y Ponce-Sánchez, 2019). Además, debe darse mayor atención al desarrollo y comercialización de nanotecnologías (NT), por su impacto socioeconómico y sobre la base de la demanda del sector industrial y sus potencialidades financieras para apoyar las investigaciones (Higuera-Ciapara y Lugo-Cervantes, 2017).

## 4. Conclusiones

Teniendo en cuenta la biodiversidad de México y la influencia actual de factores bióticos y abióticos sobre la salud humana, se precisa potenciar las investigaciones sobre biopolímeros naturales a partir de fuentes endémicas, renovables y agroresiduos industriales. Los polisacáridos más estudiados en esta década por investigadores mexicanos, son las gomas de mezquite y las pectinas, los mucílagos de nopal, *Aloe vera* y de semilla de chía, además de arabinoxilanos del maíz, fructanos de agave y quitosano. Entre las proteínas, las de soya y de la leche han sido las más investigadas, a diferencia de la ceína y proteína de amaranto.

Las investigaciones se orientan al desarrollo de temáticas novedosas como nutrigenómica y tecnologías de conservación en pre y postcosecha, a través de la diversificación de las propiedades tecnofuncionales de biopolímeros, mediante mezclas de gomas-mucílagos, polisacáridos-proteínas y modificación estructural. Las tecnologías emergentes y nanotecnologías constituyen herramientas imprescindibles para lograr estos objetivos, por su impacto tecnológico y socioeconómico.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen al CONACyT-México por las becas de estudiantes de Maestría (713901, 579982, 713902) y Doctorado en Ciencias en Alimentos (895760).

**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

**Conflicto de interés:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.



## 5. Referencias bibliográficas

- Aceituno-Medina, M., Mendoza, S., Lagaron, J. M. y López-Rubio, A. (2015). Photoprotection of folic acid upon encapsulation in food-grade amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) protein isolate - pullulan electrospun fibers. *LWT - Food Science and Technology*, 62(2), 970–975.
- Aldrete-Herrera, P. I., López, M. G., Medina-Torres, L., Ragazzo-Sánchez, J. A., Calderón-Santoyo, M., González-Ávila, M. y Ortiz-Basurto, R. I. (2019). Physicochemical composition and apparent degree of polymerization of fructans in five wild agave varieties: Potential industrial use. *Foods*, 8(9).
- Álvares-Monge-Neto, A. Á., De Cássia Bergamasco, R., De Moraes, F. F., Neto, A. M. y Peralta, R. M. (2017). Development of a technique for psyllium husk mucilage purification with simultaneous microencapsulation of curcumin. *PLoS ONE*, 12(8), 1–13.
- Arizmendi-Cotero, D., Gómez-Espinosa, R. M., Dublán García, O., Gómez-Vidales, V. y Domínguez-Lopez, A. (2016). Electron paramagnetic resonance study of hydrogen peroxide/ascorbic acid ratio as initiator redox pair in the inulin-gallic acid molecular grafting reaction. *Carbohydrate Polymers*, 136, 350–357.
- Artegoitia, V. M., de Veth, M. J., Harte, F., Ouellet, D. R. y Girard, C. L. (2015). Short communication: Casein hydrolysate and whey proteins as excipients for cyanocobalamin to increase intestinal absorption in the lactating dairy cow. *Journal of Dairy Science*, 98(11), 8128–8132.
- Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R. I., Correa-Pacheco, Z. y Corona-Rangel, M. L. (2017). Quitosano: Un polisacárido antimicrobiano versátil para frutas y hortalizas en poscosecha -una revisión. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 23(2), 103–121.
- Carvajal-Millan, E., Vargas-Albores, F., Fierro-Islas, J. M., Gollas-Galván, T., Magdaleno-Moncayo, D., Rascon-Chu, A., Martínez-Porchas, M. y Lago-Lestón, A. (2020). Arabinoxylans and gelled arabinoxylans used as anti-obesogenic agents could protect the stability of intestinal microbiota of rats consuming high-fat diets. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 71(1), 74–83.
- Casas-Godoy, L., Arrizon, J., Arrieta-Baez, D., Plou, F. J. y Sandoval, G. (2016). Synthesis and emulsifying properties of carbohydrate fatty acid esters produced from Agave tequilana fructans by enzymatic acylation. *Food Chemistry*, 204, 437–443.
- Ceja-Medina, L. I., Medina-Torres, M., Martínez-Rodríguez, I., Andrade-González, M., Calderón-Santoyo, M., Ragazzo-Sánchez, J. A., Ortiz-Basurto, R. I. (2021). In vitro symbiotic activity of *Lactobacillus plantarum* encapsulated with mixtures of Aloe vera mucilage and agave fructans and food additives as wall materials. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 20 (2), 711–723.
- Conapesca (2020). Produjo México 47 mil 664 toneladas de camarón en la temporada de captura 2019-2020. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapesca/articulos/produjo-mexico-47-mil-664-toneladas-de-camaron-en-la-temporada-de-captura-2019-2020-agricultura?idiom=es>. Accesado: 20 de octubre 2020.
- Cornejo-Ramírez, Y. I., Carvajal-Millan, E., Brown-Bórquez, F., Sánchez-Villegas, J. A. y Rascón-Chu, A. (2019). Pectin hydrogels pH stability as affected by methacrylic grafting to low methoxyl pectin structure. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(2), 531–542.
- Cortés-Camargo, S., Acuña-Avila, P. E., Rodríguez-Huezo, M. E., Román-Guerrero, A., Varela-Guerrero, V. y Pérez-Alonso, C. (2019). Effect of chia mucilage addition on oxidation and release kinetics of lemon essential oil microencapsulated using mesquite gum – Chia mucilage mixtures. *Food Research International*, 116, 1010–1019.
- Cortés-Camargo, S., Gallardo-Rivera, R., Barragán-Huerta, B. E., Dublán-García, O., Román-Guerrero, A. y Pérez-Alonso, C. (2018). Exploring the potential of mesquite gum–nopal mucilage mixtures: physicochemical and functional properties. *Journal of Food Science*, 83(1), 113–121.
- FAO. (2019). El sistema alimentario en México. Oportunidades para el campo mexicano en la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible. Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <http://www.fao.org/publications/card/es/c/CA2910ES/>.



- Figueroa-Basurto, C. I. (2019). Comparación entre las proteínas de las semillas de *Amaranthus* (amaranto) y *Phaseolus lunatus* (frijol lima) en el efecto inhibidor en la coagulación de la leche. *Investigación*, 1(1), 71–77.
- Figueroa-Hernández, C., Cruz-Guerrero, A., Rodríguez-Serrano, G., Gómez-Ruiz, L., García-Garibay, M. y Jiménez-Guzmán, J. (2012). Calcium and iron binding peptides production by *Lactococcus lactis* subsp. *Cremoris* NCFB 712. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 11(2), 259–267.
- Fuciños, C., Míguez, M., Fuciños, P., Pastrana, L. M., Rúa, M. L., y Vicente, A. A. (2017). Creating functional nanostructures: Encapsulation of caffeine into  $\alpha$ -lactalbumin nanotubes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 40, 10–17.
- Galicia-Villanueva, S., Escamilla-García, P. E., Alvarado-Raya, H., Aquino-González, L. V., Serna-Álvarez, H. y Hernández-Cruz, L. M. (2017). Plantación experimental de nopal para evaluación de sistemas de fertilización y extracción de mucílago. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1087.
- Gallegos-Garza, M. M., Lozoya-Castillo, D. L., Báez-González, J., e Alanís-Guzmán, M. G. (2017). Obtención de un complejo ovoalbúmina-antioxidantes provenientes del té verde (*Camellia sinensis*) por el método de gelación iónica. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2, 525–530.
- García-Fillería, S. F. (2019). Evaluación de aislado proteico de amaranto como fuente de péptidos antioxidantes: estudios in vitro e in vivo. *Universidad Nacional de La Plata*.
- García-Gamboa, R., Gradilla-Hernández, M. S., Ortiz-Basurto, R. I., García-Reyes, R. A. y González-Avila, M. (2020). Assessment of intermediate-and long-chains agave fructan fermentation on the growth of intestinal bacteria cultured in a gastrointestinal tract. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(2), 827–838.
- García-Saldaña, J. S., Campas-Baypoli, O. N., López-Cervantes, J., Sánchez-Machado, D. I., Cantú-Soto, E. U. y Rodríguez-Ramírez, R. (2016). Microencapsulation of sulforaphane from broccoli seed extracts by gelatin/gum arabic and gelatin/pectin complexes. *Food Chemistry*, 201, 94–100.
- Gómez-Mascaraque, L. G., Hernández-Rojas, M., Tarancón, P., Tenon, M., Feuillère, N., Vélez Ruiz, J. F., Fiszman, S. y López-Rubio, A. (2017). Impact of microencapsulation within electrosprayed proteins on the formulation of green tea extract-enriched biscuits. *LWT - Food Science and Technology*, 81, 77–86.
- González-Estrada, R. R., Carvajal-Millan, E., Ragazzo-Sánchez, J. A., Bautista-Rosales, P. U. y Calderón-Santoyo, M. (2017). Control of blue mold decay on Persian lime: Application of covalently cross-linked arabinoxylans bioactive coatings with antagonistic yeast entrapped. *LWT - Food Science and Technology*, 85, 187–196.
- González-Montemayor, Á. M., Flores-Gallegos, A. C., Contreras-Esquivel, J. C., Solanilla-Duque, J. F. y Rodríguez-Herrera, R. (2019). *Prosopis* spp. functional activities and its applications in bakery products. *Trends in Food Science and Technology*, 94, 12–19.
- Halfiter, G. (2017). La zona de transición mexicana y la megadiversidad de México : del marco histórico a la riqueza actual. *Universidad de Guadalajara*, 24(2), 77–89.
- Hernández-Téllez, C. N., Plascencia-Jatomea, M., y Cortez-Rocha, M. O. (2016). chitosan-based bionanocomposites: Development and perspectives in food and agricultural applications. En *Chitosan in the Preservation of Agricultural Commodities*, Pp. 315-338. Elsevier Inc.
- Higuera-Barraza, O. A., Del Toro-Sanchez, C. L., Ruiz-Cruz, S. y Márquez-Ríos, E. (2016). Effects of high-energy ultrasound on the functional properties of proteins. In *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 558–562.
- Higuera-Ciapara, I. y Lugo-Cervantes, E. (2017). Oportunidades para el desarrollo de los nanoalimentos en México. In *Tecnologías De Nano/Microencapsulación De Compuestos Bioactivos* (Primera ed, p. 297).
- Ignot-Gutiérrez, A., Ortiz-Basurto, R. I., García-Barradas, O., Díaz-Ramos, D. I. y Jiménez-Fernández, M. (2020). Physicochemical and functional properties of native and modified agave fructans by acylation. *Carbohydrate Polymers*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116529>
- Jain, A., Thakur, D., Ghoshal, G., Katore, O. P. y Shivhare, U. S. (2016). Characterization of microcapsulated  $\beta$ -carotene formed by complex coacervation using casein and gum tragacanth. *International Journal of Biological Macromolecules*, 101-113.
- Jiménez-Maldonado, M. I., Tiznado-Hernández, M. E., Rascón-Chu, A., Carvajal-Millan, E., Lizardi-Mendoza, J. y Troncoso-Rojas, R. (2018). Analysis of rhamnogalacturonan I fragments as elicitors of the defense

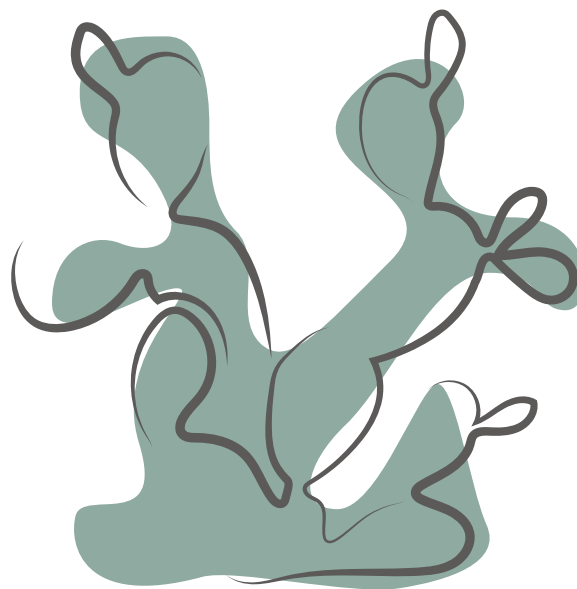
mechanism in tomato fruit. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 78(3), 339–349.

- Jimenez-Sánchez, D. E., Calderón-Santoyo, M., Ortiz-Basurto, R. I., Bautista-Rosales, P. U. y Ragazzo-Sánchez, J. A. (2018). Effect of maltodextrin reduction and native agave fructans addition on the physicochemical properties of spray-dried mango and pineapple juices. *Food Science and Technology International*, 24(6), 519–532.
- Labib, G. (2018). Overview on zein protein: a promising pharmaceutical excipient in drug delivery systems and tissue engineering. In *Expert Opinion on Drug Delivery* (Vol. 15, Issue 1, pp. 65–75). Taylor and Francis Ltd.
- Lara-Espinoza, C., Carvajal-Millan, E., Balandrán-Quintana, R., López-Franco, Y. y Rascón-Chu, A. (2018). Pectin and pectin-based composite materials: Beyond food texture. *Molecules*, 23(4).
- Layman, D. K., Lönnnerdal, B. y Fernstrom, J. D. (2018). Applications for  $\alpha$ -lactalbumin in human nutrition. *Nutrition Reviews*, 76(6), 444–460.
- Lee, S., Kim, Y. C. y Park, J. H. (2016). Zein-alginate based oral drug delivery systems: Protection and release of therapeutic proteins. *International Journal of Pharmaceutics*, 515(1–2), 300–306.
- Liang, G., Chen, W., Qie, X., Zeng, M., Qin, F., He, Z. y Chen, J. (2020). Modification of soy protein isolates using combined pre-heat treatment and controlled enzymatic hydrolysis for improving foaming properties. *Food Hydrocolloids*, 105.
- López-Franco, Y. L., Gooycolea, F. M. y Lizardi-Mendoza, J. (2021). Polysaccharides. *Polysaccharides*, 1–20.
- López, M. G., Camacho-Ruiz, R. M., González-Avila, M., Mellado-Mojica, E., Moreno-Vilet, L., Godínez-Hernández, C. I., Aguirre-Rivera, J. R., De la Mora-Amutio, M., Juárez-Flores, B. I., Ramos-Clamont-Montfort, G., Armenta-Corral, R. I., Prado-Ramírez, P. I., Herrera, P. I. y Ortiz-Basurto, R. I. (2017). Fructanos de agave: Actualidad y perspectivas. In *Panorama del aprovechamiento de los agaves en México. Estado del arte publicado por AGARED, Red temática Mexicana Aprovechamiento integral sustentable y biotecnología de los agave*.
- Macías-Cortés, E., Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzmán, N. E., Moreno-Jiménez, M. R., Medina-Torres, L. y González-Laredo, R. F. (2020a). Microencapsulation of phenolic compounds: Technologies and novel polymers. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(2), 491–521.
- Matías, L. G., Hernández-Hernández, B. R., Peña-Caballero, V., Torres-López, N. G., Ramírez, V. A., Espinoza-Martínez, V. A., y Ramírez-Pacheco, L. (2018). Current and potential uses of Amaranth (*Amaranthus spp.*). *Journal of Negative and No Positive Results*, 3(6), 423–436.
- Matros, A., Peukert, M., Lahnstein, J., Seiffert, U., y Burton, R. (2019). Determination of fructans in plants: Current analytical means for extraction, detection, and quantification. In *Annual Plant Reviews online* (pp. 117–156). Wiley.
- Medina-Torres, L., Núñez-Ramírez, D. M., Calderas, F., González-Laredo, R. F., Minjares-Fuentes, R., Valadez-García, M. A., Bernad-Bernad, M. J., y Manero, O. (2019b). Microencapsulation of gallic acid by spray drying with Aloe vera mucilage (*Aloe barbadensis* Miller) as wall material. *Industrial Crops and Products*, 138(October 2018), 111461.
- Medina-Torres, L., Santiago-Adame, R., Calderas, F., Gallegos-Infante, J. A., González-Laredo, R. F., Rocha-Guzmán, N. E., Núñez-Ramírez, D. M., Bernad-Bernad, M. J., y Manero, O. (2016). Microencapsulation by spray drying of laurel infusions (*Litsea glaucescens*) with maltodextrin. *Industrial Crops and Products*, 90, 1–8.
- Mellado-Mojica, E., y López, M. G. (2012). Fructan metabolism in *A. tequilana* Weber blue variety along its developmental cycle in the field. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(47), 11704–11713.
- Mijares-Fuentes, R., Femenia, A., Comas-Serra, F., Roselló, C., Rodríguez-González, V. M., González-Laredo, R. F., Gallegos-Infante, J. A., y Medina-Torres, L. (2016). Effect of different drying procedures on physicochemical properties and flow behavior of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel. *LWT - Food Science and Technology*, 74, 378–386.
- Miramontes-Corona, C., Escalante, A., Delgado, E., Corona-González, R. I., Vázquez-Torres, H., y Toriz, G. (2020). Hydrophobic agave fructans for sustained drug delivery to the human colon. *Reactive and Functional Polymers*, 146.
- Montemayor-Mora, G., Hernández-Reyes, K. E., Heredia-Olea, E., Pérez-Carrillo, E., Chew-Guevara, A. A., y Serna-Saldivar, S. O. (2018). Rheology, acceptability and texture of wheat flour tortillas supplemented with soybean residue. *Journal of Food Science and Technology*, 55(12), 4964–4972. 3432-3

- Morales-Ortega, Adriana, Niño-Medina, G., Carvajal-Millan, E., Gardea-Béjar, A., Torres-Chávez, P., López-Franco, Y., Rascón-Chu, A., y Lizardi-Mendoza, J. (2013). Los arabinoxilanos ferulados de cereales. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(4), 439–446.
- Moreno-Trejo, M. B., y Sánchez-Domínguez, M. (2016). Mesquite gum as a novel reducing and stabilizing agent for modified tollens synthesis of highly concentrated ag nanoparticles. *Materials*, 9(10), 817.
- Ortega, E., y Barroso, D. (2013). Flashes pediátricos AEpap: Cólico del lactante. *Rev. Pediatr Aten Primaria Supl*, 22, 81–87.
- Ortiz-Basurto, R. I., Rubio-Ibarra, M. E., Ragazzo-Sanchez, J. A., Beristain, C. I., y Jiménez-Fernández, M. (2017). Microencapsulation of *Eugenia uniflora* L. juice by spray drying using fructans with different degrees of polymerisation. *Carbohydrate Polymers*, 175, 603–609.
- Paz-Samaniego, R., Carvajal-Millan, E., Sotelo-Cruz, N., Brown, F., Rascón-Chu, A., López-Franco, Y. L., y Lizardi-Mendoza, J. (2016). Maize processing waste water upcycling in México: Recovery of arabinoxylans for probiotic encapsulation. *Sustainability (Switzerland)*, 8(11).
- Ramírez-Rivas, I. K., y Chávez-Martínez, A. (2017). Efecto del ultrasonido aplicado al suero de leche previo al calentamiento en la elaboración de requesón. *Inter ciencia*, 42(12), 828–834.
- Ramos-Hernández, J. A., Ragazzo-Sanchez, J. A., Calderón-Santoyo, M., Ortiz-Basurto, R. I., Prieto, C., y Lagaron, J. M. (2018). Use of electrosprayed agave fructans as nanoencapsulating hydrocolloids for bioactives. *Nanomaterials*, 8(11), 868–876.
- Rascón-Chu, A., Díaz-Baca, J. A., Carvajal-Millan, E., Pérez-López, E., Hotchkiss, A. T., González-Ríos, H., Balandrán-Quintana, R., y Campa-Mada, A. C. (2018). Electrosprayed core-shell composite microbeads based on pectin-arabinoxylans for insulin carrying: Aggregation and size dispersion control. *Polymers*, 10(2), 108–121.
- Rodríguez-Furlán, L. T., Aldrete-Herrera, P., Pérez-Padilla, A., Ortiz-Basurto, R. I., y Campderrós, M. E. (2014). Assessment of agave fructans as lyoprotectants of bovine plasma proteins concentrated by ultrafiltration. *Food Research International*, 56, 146–158.
- Rodríguez-Rodríguez, R., Espinosa-Andrews, H., Morales-Hernández, N., Lobato-Calleros, C., y Vernon-Carter, E. J. (2019). Mesquite gum/chitosan insoluble complexes: relationship between the water state and viscoelastic properties. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(9), 1345–1352.
- Ruan, Q. J., Wang, M. P., Zou, Y., Lin, C., Cai, D. C., y Wang, J. M. (2020). Interfacial stabilization of aqueous foam based on soy protein-rhamnolipids interacting mixture. *Industrial Crops and Products*, 153, 112587.
- Sánchez-Reséndiz, A., Rodríguez-Barrientos, S., Rodríguez-Rodríguez, J., Barba-Dávila, B., Serna-Saldivar, S. O., y Chuck-Hernández, C. (2018). Phosphoesterification of soybean and peanut proteins with sodium trimetaphosphate (STMP): Changes in structure to improve functionality for food applications. *Food Chemistry*, 260, 299–305.
- Sheng, L., Tang, G., Wang, Q., Zou, J., Ma, M., y Huang, X. (2020). Molecular characteristics and foaming properties of ovalbumin-pullulan conjugates through the Maillard reaction. *Food Hydrocolloids*, 100 (September 2019), 105384.
- SIACON-SAGARPA. (2017). Sistema de Información Estadística Agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Silva, S., Rodríguez, L. C., Fernández, E. M., y Reis, R. L. (2020). Fundamental on biopolymers membranes and films. In A. De Moraes, C. Ferreira Da Silva, & S. Vieira (Eds.), *Biopolymer membranes and films: Health, food, environment, and energy* (pp. 4–24).
- Siqueiros-Cendón, T., Arévalo-Gallegos, S., Iglesias-Figueroa, B. F., García-Montoya, I. A., Salazar-Martínez, J., y Rascón-Cruz, Q. (2014). Immunomodulatory effects of lactoferrin. *Acta Pharmacologica Sinica*, 35(5), 557–566.
- Sosa-Herrera, M. G., Martínez-Padilla, L. P., Delgado-Reyes, V. A., y Torres-Robledo, A. (2016). Effect of agave fructans on bulk and surface properties of sodium caseinate in aqueous media. *Food Hydrocolloids*, 60, 199–205.
- Sotelo-Boyás, M.E., Valverde-Aguilar, G., Plascencia-Jatomea, M., Correa-Pacheco, Z. N., Jiménez-Aparicio, A., Solorza-Feria, J., Barrera-Necha, L., y Bautista-Baños, S. (2015). Caracterización de nanopartículas de quitosano adicionadas con aceites esenciales efecto in vitro en *Pectobacterium carotovorum*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(3), 589–599.



- Suárez, S., Aphalo, P., Rinaldi, G., Añón, M. C., y Quiroga, A. (2020). Effect of amaranth proteins on the RAS system. *In vitro, in vivo and ex vivo assays. Food Chemistry*, 308.
- Sun, N., Teng, A., Zhao, Y., Liu, H., Tu, J., Jia, Q., y Wang, Q. (2020). Immunological and anticancer activities of seleno-ovalbumin (Se-OVA) on H22-bearing mice. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 657–665.
- Tapia-Hernández, José A., Torres-Chávez, P. I., Ramírez-Wong, B., Rascón-Chu, A., Plascencia-Jatomea, M., Barreras-Urbina, C. G., Rangel-Vázquez, N. A., y Rodríguez-Félix, F. (2015). Micro- and nanoparticles by electrospray: Advances and applications in foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(19), 4699–4707.
- Tapia-Hernández, José Agustín, Del-Toro-Sánchez, C. L., Cinco-Moroyoqui, F. J., Juárez-Onofre, J. E., Ruiz-Cruz, S., Carvajal-Millan, E., López-Ahumada, G. A., Castro-Enriquez, D. D., Barreras-Urbina, C. G., y Rodríguez-Félix, F. (2019). Prolamins from cereal by-products: Classification, extraction, characterization and its applications in micro- and nanofabrication. *En Trends in Food Science and Technology* (Vol. 90, pp. 111–132). Elsevier Ltd.
- Téllez-Morales, J. A., Hernández-Santo, B., y Rodríguez-Miranda, J. (2020). Effect of ultrasound on the techno-functional properties of food components/ingredients: A review. *In Ultrasonics Sonochemistry* (Vol. 61). Elsevier B.V.
- Torres, F. G., Troncoso, O. P., Pisani, A., Gatto, F., y Bardi, G. (2019). Natural polysaccharide nanomaterials: An overview of their immunological properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 20, 20, 5092.
- Tovar, A. K., Godínez, L. A., Espejel, F., Ramírez-Zamora, R. M., y Robles, I. (2019). Optimization of the integral valorization process for orange peel waste using a design of experiments approach: Production of high-quality pectin and activated carbon. *Waste Management*, 85, 202–213.
- Velasco-Reyes, J. F., Díaz-Narváez, G. C., Ramírez-Carrillo, R. E., y Pérez-Cabrera, L. E. (2019). Producción de quitosano a partir de desechos de camarón generados del procesamiento industrial. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4, 897–901.
- Velasco-Rodriguez, V., Cornejo-Mazon, M., Flores-Flores, J. O., Gutierrez-López, G. F., y Hernandez-Sanchez, H. (2012). Preparation and properties of alpha-lipoic acid-loaded chitosan nanoparticles. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 11(55), 155–161.
- Vicuña-Galindo, E., Ara-Rojas, S., y Villavicencio-Sánchez, N. (2020). Desarrollo de un modelo predictivo para la obtención de maltodextrinas del almidón de yuca. *Tecnología Química*, 40(1), 1–16.
- Villarreal, M. B., Gallardo Rivera, C. T., Márquez, E. G., Rodríguez, J. R., González, M. A. N., Montes, A. C., y Báez González, J. G. (2018). Comparative reduction of egg yolk cholesterol using anionic chelating agents. *Molecules*, 23(12), 1–12.
- Zavaleta-Avejar, L., Bosquez-Molina, E., Gimeno, M., Pérez-Orozco, J. P., y Shirai, K. (2014). Rheological and antioxidant power studies of enzymatically grafted chitosan with a hydrophobic alkyl side chain. *Food Hydrocolloids*, 39, 113–119.
- Zhang, Y., Cui, L., Li, F., Shi, N., Li, C., Yu, X., Chen, Y., y Kong, W. (2016). Design, fabrication and biomedical applications of zein-based nano/micro-carrier systems. *International Journal of Pharmaceutics*, 513, 1–2, 191–210.
- Ziemichód, A., Wójcik, M., y Różyło, R. (2019). Seeds of *Plantago psyllium* and *Plantago ovata*: Mineral composition, grinding, and use for gluten-free bread as substitutes for hydrocolloids. *Journal of Food Process Engineering*, 42(1), 1–9.



## Aplicaciones tecnofuncionales de fructanos tipo inulina y agavina, potencial de los fructanos modificados

Díaz-Ramos, Dafne Ivette<sup>1</sup>  
 Jiménez-Fernández, Maribel<sup>2</sup> \*  
 García-Barradas, Oscar<sup>3</sup>  
 Chacón- López Alejandra<sup>1</sup>  
 López- García, Ulises<sup>1</sup>  
 Ortiz-Basurto, Rosa Isela<sup>1</sup> \*

<sup>1</sup> TecNM-Instituto Tecnológico de Tepic.  
 Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos.  
 Av. Tecnológico #2595, Col. Lagos del Country, C.P.  
 63175, Tepic, Nayarit, México.

<sup>2</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos,  
 Universidad Veracruzana.  
 Av. Dr. Luis Castelazo, Industrial las Ánimas, C.P.  
 91190 Xalapa, Veracruz, México.

<sup>3</sup> Unidad de Servicios de Apoyo en Resolución Analítica,  
 Universidad Veracruzana.  
 Av. Dr. Luis Castelazo, Industrial las Ánimas, C.P.  
 91190 Xalapa, Veracruz, México.

\*Correspondencia:  
 RIOB, <https://orcid.org/0000-0002-8284-4690>,  
 riobasurt@ittec.edu.mx; Tel. 3112241882.

MJF, <https://orcid.org/0000-0001-5437-3812>,  
 maribjimenez@uv.mx; Tel. 2288418900.

En atención a las nuevas políticas para lograr la economía circular en México, el aprovechamiento de cultivos subutilizados y/o residuos alimenticios es una prioridad. México es el país de origen y diversidad de especies de agaves con metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), cultivo económicamente estratégico en zonas áridas, ya que, gracias al tipo de metabolismo CAM, producen fructanos de reserva, asegurando el cultivo aún en condiciones climáticas extremas. Los fructanos son oligo y polisacáridos derivados de la fructosa que se clasifican con base en su estructura, enlace fructosil y grado de polimerización (GP). Son de alto interés como aditivo alimentario, debido a que, además de sus propiedades tecnofuncionales (PTF), han demostrado efecto como fibra alimentaria prebiótica, y por ello, el gran interés de ser utilizadas para el desarrollo de alimentos funcionales. Sin embargo, poseen propiedades que limitan su estabilidad y propiedades tecnológicas, en el desarrollo de formulaciones alimentarias. Por lo anterior, se han propuesto técnicas de modificación enzimática, física y química, siendo esta última la más utilizada, debido a la presencia de grupos funcionales que permiten la unión de radicales específicos para ser modificados y así fortalecer u otorgar nuevas propiedades tecnológicas. Los fructanos lineales tipo inulina, son los más estudiados y usados como fibra prebiótica en la industria de alimentos, sin embargo, en la última década, los fructanos ramificados representados por las agavinas de la familia *Agavaceae*, están ganado interés por su efecto prebiótico y las PTF específicas que están demostrando en su forma nativa o fracciones con diferente grado de polimerización. Esta revisión presenta las principales aplicaciones tecnológicas y biológicas de estos biopolímeros prebióticos en su forma nativa, fracciones con GP específicos, mezclas y modificados, así como un análisis de las perspectivas potenciales que permitan la formación de matrices poliméricas de interés agroindustrial y uso potencial

**Palabras clave:** Agave; Esterificación; Fructanos; Modificación química; Propiedades tecnofuncionales.

## Introducción

Debido a la reciente regulación del uso de recursos ecológicos para lograr mejores flujos económicos en México, las propuestas en investigación han tomado un nuevo rumbo, para fortalecer el aprovechamiento de subproductos o residuos alimenticios. En ese sentido, México es el país con mayor diversidad de especies de agave, un recurso muy bien aprovechado por la industria de alimentos, principalmente en bebidas, también se producen carbohidratos de reserva (fructanos) que son usados como aditivo alimentario por ser una fibra prebiótica y demostrar efectos benéficos en la salud del consumidor (Sosa-Herrera y Delgado-Reyes, 2017). Los fructanos

(FT) se sintetizan a partir de una molécula inicial de sacarosa, y se añaden residuos de fructosa con enlaces  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 1) o  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 6), los cuales, al no ser digeridos por el humano, se clasifican como fibra prebiótica soluble (Santiago-García *et al.*, 2016). El GP de la cadena de fructanos varía dependiendo de la especie y las condiciones ambientales. Las cadenas con un GP de 3 a 9 se denominan fructo-oligosacáridos (FOS), mientras que aquellas con un GP  $\geq 10$  se denominan polifructanos (Matros *et al.*, 2019). Los grupos OH que les confieren una alta hidrofiliidad, limitan su uso en el desarrollo y aplicación de productos. Por lo anterior, se han desarrollado diferentes técnicas de modificación en biopolímeros, siendo una de ellas, la modificación química, que consiste en la introducción de grupos funcionales mediante esterificación u otros tipos de reacción. Este tipo de modificación es diferente de otras, ya que la adición de un grupo éster u otro radical en el polisacárido, permite modificar la naturaleza hidrofílica y obtener cambios significativos en las propiedades mecánicas y térmicas (Nonhlanhla *et al.*, 2016). Esta modificación resulta ser una excelente alternativa para mejorar sus aplicaciones y PTF. Por lo anterior, esta revisión se centra en las modificaciones químicas realizadas en fructanos lineales tipo inulina, haciendo énfasis en las aplicaciones tecno-funcionales otorgadas una vez modificadas, en contraparte, se compara con los estudios realizados hasta el momento en los fructanos nativos y fracciones de fructanos de agave, finalmente se analiza la perspectiva y potencial aplicación de ambos tipos de fructanos.

## 1. Fuentes de fructanos

De acuerdo con la posición del enlace de las unidades  $\beta$ -fructofuranosilo (*FIGURA 1*), los tipos de fructanos se pueden clasificar en: i) inulinas lineales, sintetizados a partir del trisacárido 1-kestosa con unidades adicionales de fructosa ligada mediante enlaces  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 1), encontradas en monocotiledóneas (*FIGURA 2A*); ii) levanos, escasamente ramificados sintetizados a partir de los trisacáridos de 6-kestosa, en los que los residuos de fructosa están unidos por enlaces glicosídicos  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 6), se encuentran en pastos *Phleum pratense* o de origen bacteriano (*FIGURA 2B*); iii) los graminanos se sintetizan a partir de 1-kestose y sacarosa, produciendo bifurcosa, este tetrasacárido se alarga con residuos de fructosa unidos por enlaces  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 1) y  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 6), generando una estructura ramificada (*FIGURA 2C*), se encuentran principalmente en monocotiledóneas; iv) la neoinulina se forma de neo-kestosa que se alarga con residuos de fructosa con enlaces  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 1), se encuentra en Asparagales (*figura 2D*); v) los neolevanos también se forman a partir de neo-kestose, alargado por residuos de fructosa con enlaces  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 6) (*FIGURA 2E*), presentes *Poaceae monoots* (Tungland, 2018); vi) finalmente, los fructanos mixtos o neofructanos ramificados (*FIGURA 3*) se forman a partir de neo-kes-

tosa, con moléculas de fructosa polimerizadas  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 1) y  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 6), generando estructura altamente ramificada que se encuentra en monocotiledoneas como agave spp y propuestas como agavinas; por su fuente contienen de 3 a 29 o hasta 80 unidades monoméricas (Aldrete-Herrera *et al.*, 2019).

Figura 1. Modelo de biosíntesis de fructanos en plantas

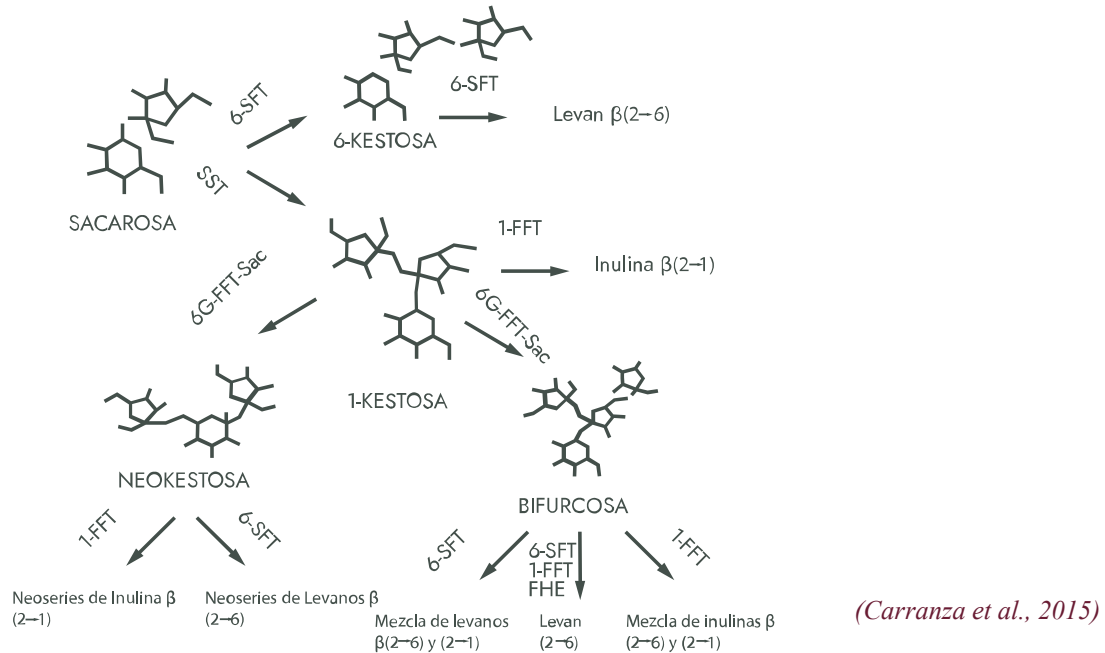
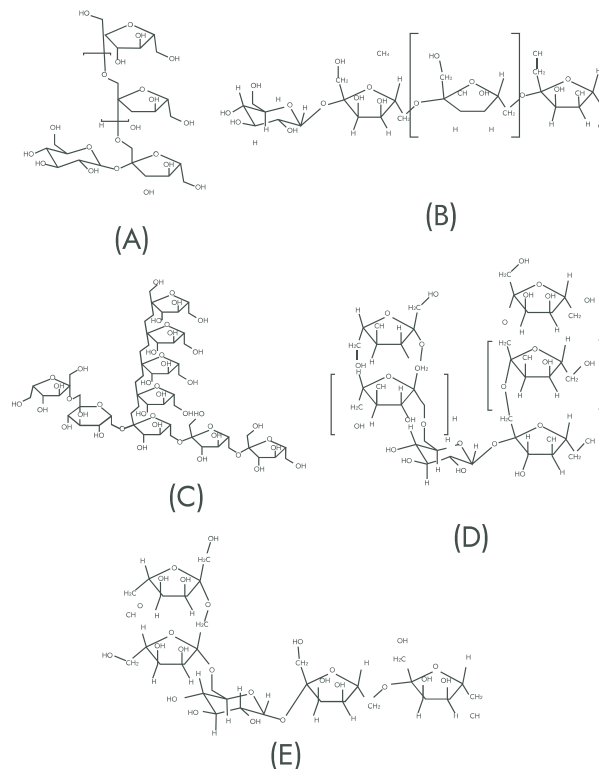


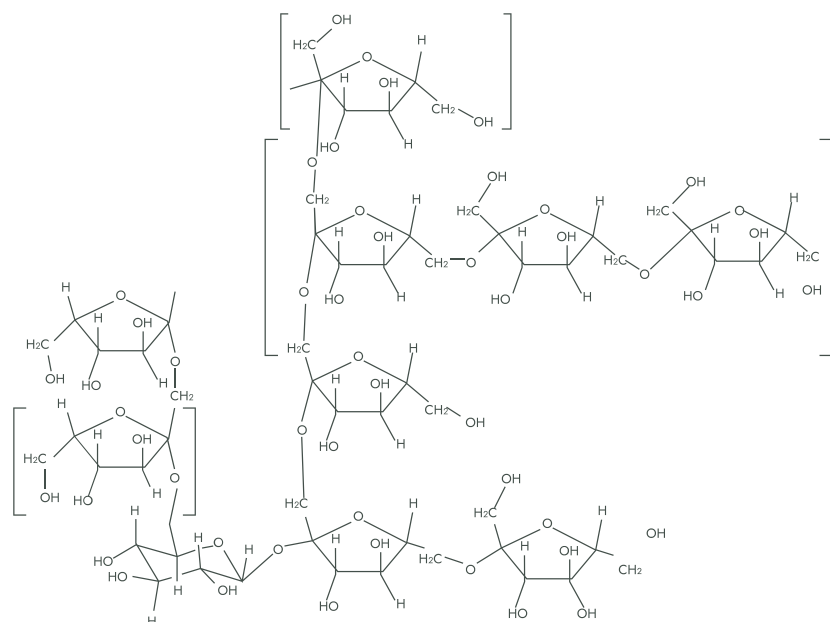
Figura 2. Estructuras moleculares de fructanos tipo inulina (A), levanos (B), graminanos (C), neoserias de inulina (D), neoserias de levanos (E)



(Moreno-Vilet *et al.*, 2016)

Dentro de los fructanos mixtos, se encuentran las Agavinas, llamadas así porque se encuentran en especies de agave y consisten en neo-fructanos ramificados. Son biopolímeros de fructosa que se caracterizan por presentar enlaces  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 1), como  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 6) y una molécula de glucosa intermedia (FIGURA 3).

Figura 3. Estructura química de Agavina



(Moreno-Vilet et al., 2016)

## 2. Obtención de fracciones de fructanos de agave

La tecnología de filtración con membrana es una alternativa en los procesos de separación, purificación o concentración de productos de interés. Para el caso de inulinas existen patentes que describen el proceso de obtención de fracciones de fructanos, Beneo-Orafti es uno de los principales distribuidores. Por otra parte, Ortiz-Basurto *et al.*, (2008) reportaron el proceso de clarificación y obtención de fracciones de fructanos de agave enriquecidos con bajo, medio y alto GP, mediante micro y ultrafiltración con pilotos en flujo tangencial, resaltando que en los perfiles de distribución de fructanos obtenidos por cromatografía con detector amperométrico (HPAEC) se identifican trazas de fructanos que presentan mismos GP en permeado y retenido y no se reducen pese a las diafiltraciones, lo cual, permite suponer que los fructanos ramificados son los principalmente retenidos y los lineales logran pasar y reducirse de la fracción enriquecida en base al número de diafiltraciones aplicadas. Con esta metodología se obtienen fracciones de fructanos enriquecidos con GP mayor a 30 denominados con Alto Grado de Polimerización (AGP) entre 30 y 10, denominados con Medio (MGP), fructo-oligosacáridos con GP 10-3 (FOS) y un jarabe fructosado funcional con mono y disacáridos mayoritariamente.

### 2.1 Propiedades de fructanos tipo inulina y agave

Las propiedades de los carbohidratos, dependen en gran parte de sus estructuras moleculares (Gerschenson *et al.*, 2017). El GP y grado de ramificación (GR), los cuales, están directamente relacionados con la especie de la planta, cultivo, prácticas agronómicas, condiciones de crecimiento, uso



de fertilizantes, lluvia, temperatura, condiciones de suelo durante la cosecha. Refiriéndonos específicamente a los fructanos tipo inulina y agave, una de las propiedades más importantes es su alta solubilidad, la cual, está inversamente relacionada con su GP. Este define las propiedades físicas, la capacidad de formación de gel y su resistencia, así como su interacción con otros componentes alimenticios (Meyer *et al.*, 2011). A diferencia de las estructuras lineales de inulina y levanos de cadena larga, las agavinas son una mezcla de fructanos lineales y ramificados, lo que da como resultado una mayor solubilidad y bajas propiedades de formación de gel (Tungland, 2018).

### 3. Aplicaciones tecnológicas y funcionales de fructanos y fracciones sin modificar

Las aplicaciones tecnológicas de los fructanos (TABLA 1 Y 2), dependen directamente de sus características estructurales, las cuales como ya fue presentado, están asociadas con la fuente de su origen (Sosa-Herrera y Delgado-Reyes, 2017).

El uso de inulina como agente de carga para reemplazar el azúcar y la grasa en los alimentos se ve favorecido por sus propiedades particulares de solubilidad en agua (Apolinário *et al.*, 2014). Esta propiedad proporciona a la inulina, con GP > 20, características surfactantes y capaces de formar redes de gel microcristalinas tridimensionales estables en concentraciones de 13-50 %. Estos geles proporcionan características estructurales cremosas similares a la grasa que se utiliza, en productos para untar, aderezos, productos lácteos, productos horneados y helados. Mientras que los fructanos de agave debido a su alta solubilidad se aplican en bebidas o como estabilizantes (Tungland, 2018).

Tabla 1. Principales aplicaciones de fructanos inulina y agave

| Tipo de fructano          | Característica                     | Aplicación                                                                                                                               | Referencia                        |
|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Lineal<br>(Inulina)       | Perfil de dulzor                   | Bajo GP reemplazo de la sacarosa total o parcial, combinado con otros edulcorantes no calóricos.                                         | Guggisberg <i>et al.</i> , 2009   |
|                           | Capacidad de formar microcristales | Sustituto de grasa y proporciona una palatabilidad similar a la grasa.                                                                   | Tárrega <i>et al.</i> , 2010      |
|                           | Baja viscosidad                    | En combinación con otros hidrocoloides, puede influir su comportamiento reológico.                                                       | López-Molina <i>et al.</i> , 2005 |
| Ramificados<br>(Agavinas) | Alta solubilidad                   | Adecuados para sistemas de bebidas y en productos no carbonatados, batidos, bebidas lácteas, yogurt y otros productos altamente húmedos. | Meyer, 2009                       |
|                           | Baja adherencia                    | Recubrimientos sin azúcar que requieren solubilidad sin humectación.                                                                     | Tungland, 2018                    |

Respecto a los fructanos de agave, la especie más estudiada en la producción de fructanos con efecto prebiótico demostrado es *A. tequilana*, sin embargo, se siguen estudiando diversas especies con la finalidad de identificar sus propiedades funcionales y sobre ellas definir aplicaciones específicas en la industria alimentaria y farmacéutica, entre otras (Aldrete-Herrera *et al.*, 2019). Se ha reportado su uso como lioprotector (agente protector) de proteínas, se ha descubierto que la presencia de sacáridos durante el proceso de liofilización conserva la estructura nativa de las proteínas. Los mecanismos por los cuales los sacáridos estabilizan las proteínas durante este proceso se deben a su capacidad

para inducir un estado vítreo que inhibe la cristalización e influye en la cinética de las reacciones de deterioro durante el almacenamiento (Rodríguez Furlán *et al.*, 2012) debido a que, estabilizan las membranas celulares durante la deshidratación. Rodríguez Furlán *et al.* (2014) reportaron que los fructanos de agave de alto rendimiento (FAAR) y alto grado (FAGP) (GP 4-80 y 24-80) respectivamente, tuvieron un efecto protector sobre las proteínas plasmáticas bovinas durante el proceso de liofilizado, reduciendo su desnaturalización aproximadamente un 10 % a -40 °C, en las fracciones. Las proteínas plasmáticas bovinas protegidas con fructanos de agave presentaron mayor tiempo de vida de anaquel que el control, siendo la eficacia evaluada de: FAGP > FAAR > Control.

Las propiedades térmicas de los fructanos de *A. tequilana*, resaltan que la Tg está relacionada con las estructuras, GP y GR. Sobre esta propiedad, se ha reportado que la presencia de monosacáridos (principalmente fructosa) tiene un impacto negativo en la Tg (Espinosa-Andrews y Urias-Silvas, 2012). De tal manera que, el uso de fracciones enriquecidas principalmente con fructanos de alto GP, con baja concentración o sin la presencia de azúcares simples conocida como fructanos de agave de alto rendimiento (FAAR), ha resultado ser de interés cuando el producto debe ser sometido al tratamiento térmico (Santiago-García *et al.*, 2017). Por ello, Ortiz-Basurto *et al.* (2017) evaluaron fracciones de fructanos de agave con diferente GP y maltodextrina (MD) como materiales de pared en la microencapsulación de jugo de pitanga (*E. uniflora* L.) para la protección de compuestos antioxidantes; se reportó que las fracciones de fructanos proporcionaron un grado de protección similar al de MD. La retención de antocianinas y las propiedades antioxidantes dependen de la proporción del material de pared utilizado. Por lo que, los fructanos de agave con alto grado de polimerización (FAGP) y alto rendimiento (FAAR), son una alternativa adecuada para la encapsulación y protección de antioxidantes.

En cuanto al efecto prebiótico de los fructanos, se ha demostrado que los fructanos poseen una amplia dispersión de GP y muestran una actividad prebiótica diferente (Mueller *et al.*, 2016). García-Gamboa *et al.* (2020), evaluaron la fermentación de fructanos de agave de cadena intermedia (IGP) y larga (AGP) sobre el crecimiento de bacterias intestinales en un simulador de tracto digestivo humano, inoculando *Lactobacillus spp.*, *Bifidobacterium spp.*, *Clostridium spp.*, y *Salmonella spp.* La actividad prebiótica se observó cuando las fracciones fueron administradas a largo plazo, llegando a la conclusión de que pueden inhibir el crecimiento de patógenos asociados con enfermedades del tracto gastrointestinal.

Agave angustifolia, almacena una mezcla compleja de graminanos y neo-fructanos altamente ramificados también definidos como agavinas (Mancilla-Margalli y López, 2006). Estas tienen la capacidad de promover el crecimiento de bifidobacterias y lactobacilos, así como de estimular la regulación del apetito que demuestra su potencial prebiótico (Santiago-García y López, 2014), además de mostrar propiedades tecnológicas de acuerdo con su GP (Tungland y Meyer, 2002). Las Agavinas se pueden usar para dar un efecto mimético de la grasa en algunos alimentos, generando un nuevo producto alimenticio funcional (Tungland y Meyer, 2002).

Santiago-García *et al.* (2017), evaluaron la aplicación tecnológica de fructanos de *Agave angustifolia* con alto GP (AAGP) como un potencial sustituto de grasa en la producción de galletas. Los resultados mostraron que las proteínas en las muestras no se modificaron cuando se agregaron agavinas. El azúcar total aumentó con la adición de agavinas de 4.28 a 11.42 %, la cual, ayuda a incorporar el aire en la grasa y mantener la humedad. Además, las muestras con AAGP aumentaron su volumen con agua, lo que podría causar saciedad. El uso de estos fructanos como sustituto de la grasa en las galletas fue eficaz con ventajas tecnológicas y nutricionales. Otros efectos y aplicación reportada en las diferentes especies de agaves se encuentran en la TABLA 2.

Tabla 2. Aplicaciones de fructanos de agave de diferentes especies

| Tipo de fructano    | Característica                          | Aplicación                                                                                                                                                          | Referencia                            |
|---------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| <i>Tequilana</i>    | Protector de proteínas en plasma bovino | Mejoró las propiedades funcionales, debido a la estabilización máxima de plasma bovino.                                                                             | Rodríguez Furlán <i>et al.</i> , 2014 |
|                     | Material de pared                       | Las fracciones protegieron en mayor grado a los antioxidantes durante el secado y el almacenamiento.                                                                | Ortiz-Basurto <i>et al.</i> , 2017    |
|                     | Efecto prebiótico                       | IGP y AGP, inhibieron el crecimiento de <i>Clostridium spp.</i> y <i>Salmonella spp.</i>                                                                            | García-Gamboa <i>et al.</i> , 2020    |
| <i>Angustifolia</i> | Sustituto de grasa                      | Ejerce una contribución positiva como sustituto de grasa, tales como, bajo contenido calórico, capacidad prebiótica y contribuye a reducir la ingesta de energía.   | Santiago-García <i>et al.</i> , 2017  |
| <i>Salmiana</i>     | Suplemento dietético                    | Efectos fisio-metabólicos positivos especialmente en dosis de 12.5 % después del séptimo día de consumo, por lo que se puede utilizar como un suplemento dietético. | Castillo Andrade <i>et al.</i> , 2018 |

## 4. Tipos de modificación en polisacáridos

Debido a su diversidad estructural y propiedades, los polisacáridos son fuentes renovables interesantes que se pueden utilizar como biomateriales de alto rendimiento (Kalia, 2011). Sin embargo, el uso de polisacáridos nativos no siempre presenta el mayor potencial de uso tecnológico. Por estas razones, se siguen explorando nuevas formas para modificar su estructura y conferir propiedades físicas, químicas y mecánicas que permitan ampliar sus propiedades funcionales biológicas y/o tecnológicas para aumentar su aprovechamiento y aplicación (Karaki *et al.*, 2016), lo cual fortalecería la implementación de la economía circular.

Los polisacáridos tienen grupos altamente reactivos que permiten la inserción de radicales o grupos funcionales. Por lo anterior, a lo largo de los años, se han llevado a cabo diversos tipos de modificaciones (enzimáticas, químicas y físicas) para mejorar sus propiedades y, generar nuevas funcionalidades (TABLA 3).

Tabla 3. Tipos de modificaciones en polisacáridos.

| Modificación | Generalidades                                                                                 | Ventajas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Aplicaciones                                                                                                                                                                                                                |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Enzimática   | Modifican la estructura y las propiedades de los polisacáridos (Karaki <i>et al.</i> , 2016). | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Reacción no agresiva con alta selectividad y especificidad del sustrato en la síntesis de productos con estructura definida y /o estereoespecífica (Cunha y Gandini, 2010).</li> <li>- Se realizan en condiciones suaves con menor producción de subproductos no deseados (Gübitz y Paulo, 2003).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Mejoran las propiedades mecánicas y /o biofuncionales de los biopolímeros.</li> <li>-Optimizan las propiedades existentes en los polímeros (Karaki <i>et al.</i>, 2016).</li> </ul> |

|         |                                                                                                          |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                               |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Química | Mejoran las propiedades mecánicas, biocompatibilidad y solubilidad (D'Ayala <i>et al.</i> , 2008).       | -Obtención de derivados de polisacáridos.<br>-Poseen grupos hidrofílicos, con los que pueden formar enlaces no covalentes (Liu <i>et al.</i> , 2008). | -Esterificación de polisacáridos con ácidos orgánicos (Heinze, 2006).<br>-Introducción de grupos éster.<br>-Modificación de la naturaleza Hidrofílica.<br>-Cambios en las propiedades mecánicas y térmicas (Kapusniak, 2004). |
| Física  | Mejoran propiedades biológicas al modificar las propiedades fisicoquímicas (Zhang <i>et al.</i> , 2013). | -Sin tratamiento químico.<br>- Simple y segura.<br>-Mejora la solubilidad en agua y reduce el tamaño de partículas (Ashogbon y Akintayo, 2014).       | - Cambios en la estructura nativa y terciaria en proteínas (Considine <i>et al.</i> , 2007).                                                                                                                                  |

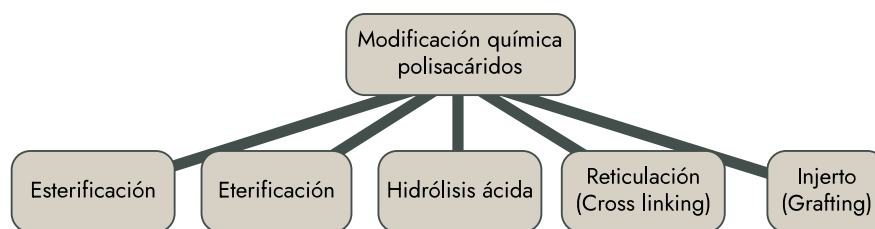
#### 4.1 Modificación Química

La modificación química se lleva a cabo mediante la introducción de un grupo funcional en los grupos OH de mayor presencia, responsables del carácter hidrófilo, y más susceptibles a reaccionar (Din *et al.*, 2017; Cunha y Gandini, 2010). Sin embargo, existen diversos tipos de modificaciones químicas (FIGURA 4), las cuales confieren nuevas propiedades a los polisacáridos (TABLA 4).

Tabla 4. Descripción y propiedades conferidas a polisacáridos por modificación química

| Modificación química              | Descripción                                                                                            | Propiedad                                                           | Referencia                   |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Acilación                         | Adición de un grupo acilo                                                                              | Aumenta hidrofobicidad.                                             | Zhang <i>et al.</i> , 2017   |
| Hidrólisis ácida                  | Rompimiento de enlace químico por sustitución nucleofílica con adición de agua.                        | Aumenta la cristalinidad y transiciones térmicas.                   | Yang <i>et al.</i> , 2018    |
| Acetilación                       | Introducción de un grupo acetilo y eliminación de hidrógeno, forma un éster.                           | Reduce solubilidad en agua.<br>Reducción de hidrofilia              | Haq <i>et al.</i> , 2019     |
| Esterificación de arilo           | Adición de un grupo arilo                                                                              | Aumenta la hidrofobicidad e interacciones con polímeros no polares. | Minimol <i>et al.</i> , 2013 |
| Carboximetilación                 | Esterificación de grupos carboximetilo aniónicos.                                                      | Mejora la hidrofiliidad y absorción de agua.                        | Lawal <i>et al.</i> , 2009   |
| Reticulación/<br>Entrecruzamiento | Producción de enlaces laterales químicos en diferentes cadenas, interacción con enlaces H <sup>+</sup> | Disminuye la solubilidad, adhesión y propiedades de hinchamiento.   | Haq <i>et al.</i> , 2019     |
| Injerto                           | Unión covalente de monómeros en la cadena principal del polímero                                       | Disminuye la capacidad de retención de agua                         | Tosh y Ranjan, 2014          |

Figura 4. Esquema de los métodos clásicos de modificación química en polisacáridos (modificado de Chen *et al.*, 2018)



En los últimos años se han realizado estudios de modificación química en biopolímeros de mayor aplicación industrial, como almidón, quitosano y quitina entre otros, logrando mejorar sus propiedades fisicoquímicas y potenciar aplicaciones. A continuación, se presenta la revisión de inulinas y los escasos estudios de fructanos de agaves.

El uso generalizado de inulina en la industria alimentaria y farmacéutica puede atribuirse a sus propiedades deseables comunes a muchos polisacáridos, como biocompatibilidad, biodegradabilidad, renovabilidad, no toxicidad, y resaltar su efecto prebiótico. La estructura química de los fructanos permite la reticulación física o química en redes tridimensionales poliméricas llamadas hidrogeles, que son capaces de absorber grandes cantidades de solución acuosa, y conservarse insoluble (Caló y Khutoryanskiy, 2015). La excelente capacidad de hinchamiento, permeabilidad y biodegradabilidad hacen que los hidrogeles basados en polisacáridos sean vehículos de administración de fármacos. Con base en lo anterior, Afinjuomo *et al.* (2019), sintetizaron y caracterizaron un hidrogel de inulina reticulado con dianhídrido piromelítico (PMDA), para producir un nuevo hidrogel sensible al pH, ya que los dianhídridos proporcionan una reticulación conveniente debido a su rápida reactividad, con los grupos hidroxilo de los polisacáridos. Se reportó que, al variar la relación de PMDA, se pueden obtener hidrogeles con diferente densidad de reticulación. Es importante destacar que el hinchamiento debido a la alta capacidad de absorción de agua depende del pH, por lo tanto, este hidrogel es un posible portador para la administración dirigida al colon, en el que las propiedades mecánicas y de hinchamiento se pueden equilibrar para una liberación optimizada del fármaco.

Las modificaciones en inulinas son aplicadas principalmente a nivel farmacéutico. Dentro de éstas, se encuentra el uso de nanopartículas lipídicas sólidas (NLS), las cuales, son portadoras de tamaño submicrónico o nanocompuestos de lípidos fisiológicamente compatibles con un alto punto de fusión (Asawale y Kumbhar, 2014). Por lo anterior, Peng *et al.* (2019), evaluaron la estabilidad de almacenamiento mejorada de NLS por modificación superficial de derivados de inulina anfifílicos en forma de peine. Sintetizaron dos materiales macromoleculares anfifílicos (CAM), dodecil inulina (Inu12) y octadecil inulina (Inu18), y los utilizaron como emulsionantes para modificar y estabilizar las SLN. Se reportó que, Inu12 e Inu18 pueden reducir más eficazmente la cristalinidad de los lípidos y el orden de la red cristalina de las NLS frente a Poloxamer 188 y Tween-80 (tensioactivos de cadena lineal comunes). Después de seis meses de almacenamiento a 4 °C y 25 °C, tanto el blanco como las NLS Inu12 /Inu18 cargadas con ciclosporina A (CsA) tenían una transición cristalina más lenta que el Tween /P188-SLN. En ambos aspectos, los derivados de inulina anfifílicos en forma de peine, fueron superiores a los tensioactivos comunes.

Walz *et al.* (2018) realizaron estudios de degradación de inulina modificada como material de encapsulación para la orientación del colon y la liberación de mesalamina. Se encontró que, la acetilación

de la inulina condujo a una reducción de la degradabilidad enzimática por las enzimas inulinasa y esterasa, producidas por la microbiota de colon.

Por su parte Jain *et al.* (2014), evaluaron la modificación de inulina a acetato de inulina (AIN), para hacerla procesable mediante electropulverización, debido a que, en estudios previos, observaron que las micropartículas de inulina son difíciles de fabricar mediante electropulverización. Las micropartículas de AIN sintetizadas, fueron evaluadas por su capacidad para administrar indometacina específicamente en el colon mediante la realización de estudios de liberación *in vitro* en diversos fluidos gastrointestinales simulados. Los resultados demostraron que la acetilación aumentó la capacidad de procesamiento de la inulina para formar microesferas mediante electrospray.

En los últimos años, se ha incrementado el interés en la modificación de la inulina para formar una gama de productos químicos especializados (Stevens *et al.*, 2001). Inutec SP1 es un derivado de inulina modificado hidrofobicamente (Exerowa *et al.*, 2007). Kokubun *et al.* (2018) sintetizaron derivados de inulina octenil y dodecenil succínico e investigaron sus soluciones y propiedades interfaciales en comparación con Inutec SP1 y evaluaron su capacidad para encapsular betacaroteno insoluble en agua. Se reportó que, los derivados sintetizados de anhídrido octenil y dodecenil succínico (OSA y DDSA) formaron agregados micelares en solución por encima de la agregación crítica. También formaron emulsiones estables de aceite en agua (O /W). La DDSA-inulina con un alto grado de sustitución fue eficaz para encapsular beta caroteno. Los resultados confirman la aplicación potencial de estos materiales en áreas como: administración de medicamentos, productos farmacéuticos, cosméticos y cuidado personal.

La modificación química de la inulina ha permitido crear polímeros anfífilicos utilizando ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), epóxidos de alquilo e isocianatos de alquilo, respectivamente. Han *et al.* (2017, 2015) realizaron una serie de derivados de inulina succinilada con longitudes de cadena de alqueno variables (C8-C18), así como la síntesis, caracterización y propiedades fisicoquímicas de inulina modificada hidrofobicamente usando cloruros de acilo de cadena larga, demostrando que la inulina puede modificarse con éxito en agua usando una solución de cloruros de acilo grasos para producir moléculas anfífilicas que se asocian en solución por encima de una concentración crítica para formar agregados micelares. Se identificó que los derivados C10, C12 y C14 son capaces de formar emulsiones de aceite en agua, mientras que el derivado C16 produce emulsiones de agua en aceite. Por lo anterior se visualiza que, estos materiales son idóneos para aplicaciones en alimentos, cosméticos y farmacia.

A pesar de las diversas aplicaciones ya mencionadas, en la actualidad no hay suficientes datos científicos sobre la actividad antimicrobiana de inulina modificada y su aplicación en el campo de la medicina, veterinaria y agricultura. Petkova *et al.*, (2017), diseñaron acetatos de inulina (AIN) con potencial actividad, contra algunos microorganismos patógenos. Evaluaron la influencia de la longitud de la cadena de carbohidratos y los residuos de acetilo en el crecimiento de diferentes microorganismos. Reportaron que, los acetatos de inulina de cadena corta y media poseían un efecto antimicrobiano más fuerte que los acetatos de inulina de cadena larga, esto podría explicarse por la menor difusión de los acetatos de inulina de cadena larga en el agar. La actividad antifúngica de los AIN revela un nuevo aspecto de su posible aplicación como bioproductos contra algunos patógenos vegetales y el desarrollo de formulaciones amigables con el medio ambiente. La TABLA 5 engloba los aspectos más importantes de modificación en inulinas.



Tabla 5. Aplicación y efecto de inulinas modificadas

| Tipo de Inulina/<br>Reacción                  | Propiedad mejorada                           | Aplicación                                               | Efecto                                                                                    | Referencia                     |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Entrecruzamiento                              | Densidad de reticulación                     | Hidrogeles modificados                                   | El grado de hinchamiento fue inversamente proporcional a la densidad de reticulación.     | Afinjuomo <i>et al.</i> , 2019 |
| Inulina sintetizada                           | Estabilidad                                  |                                                          | Mayor estabilidad física de almacenamiento de los SLN.                                    | Peng <i>et al.</i> , 2019      |
| Inulina comercial Inutec SP1                  | Propiedades interfaciales y de emulsionantes | Nanopartículas de lípidos sólidos (SLN)<br>Encapsulación | A mayor grado de modificación hay más efectividad para encapsular y liberar el compuesto. | Kokubun <i>et al.</i> , 2018   |
| Inulina GP (20) Acetilación                   | Comportamiento de liberación.                | Material de encapsulación                                | Alto rendimiento y eficiencia de encapsulación.                                           | Walz <i>et al.</i> , 2018      |
| Inulina GP (7-9, 9-12, 22) Acetilación        | Actividad antifúngica                        | Pesticidas                                               | Inhibición del hongo <i>B. bassiana</i> en concentración de 5 mg/mL.                      | Petkova <i>et al.</i> , 2017   |
| Inulina GP (<10) Acilación, Alquilación (2-8) | Capacidad emulsionante                       | Derivados de inulina                                     | Agregados micelares, agentes de encapsulación y estabilización de emulsiones.             | Han <i>et al.</i> , 2015, 2017 |
| Inulina GP (30) Acetilación                   | Aumento de solubilidad                       | Fabricación de micropartículas                           | No compromete la capacidad de direccionamiento hacia el colon.                            | Jain <i>et al.</i> , 2014      |

## 4.2 Potencial de la modificación de fructanos de agave

Aunque la modificación de los fructanos de agave ha sido limitada, existen estudios que demuestran su potencial, principalmente a nivel farmacéutico, aún hay un amplio campo de aplicación para estos fructanos que no han sido explorados en otras áreas.

Miramontes-Corona *et al.*, (2020, 2019) modificaron fructanos de agave con restos acetilo, lauroilo y palmitoilo para encapsular ibuprofeno. Reportaron que, un GS alto y un GP mayor a 16 carbonos es necesario para obtener compuestos hidrófobos. Además, caracterizaron la liberación enzimática en condiciones de colon simulado. Se demostró que la eficiencia de encapsulación aumentó de 0.8 % (fructano no modificado) a 17 o 21.5 % cuando se acetilo con alto GS (2.75) y por acilación con palmitoilo en bajo GS (0.18). Las microesferas hidrofóbicas mostraron una alta estabilidad al pH gástrico y liberación prolongada del fármaco.

Por su parte, Ignot-Gutiérrez *et al.* (2020) esterificaron fructanos de agave con ácido láurico y evaluaron diversas propiedades fisicoquímicas y funcionales a diferentes pHs. Los compuestos acilados exhibieron color, humedad y actividad acuosa similar a los no modificados. Sin embargo, la solubilidad, capacidad de hinchamiento, actividad emulsionante y capacidad de espuma se modi-



ficaron significativamente con respecto a los nativos; mostrando propiedades funcionales mejoradas en comparación con los no modificados.

De acuerdo a lo investigado en relación a la modificación de inulinas y las propiedades funcionales biológicas y tecnológicas que han demostrado los fructanos de *A. Tequilana* y otras especies, es evidente que la obtención de fracciones con rangos de GP específicos y la modificación de los fructanos de agave son un campo de estudio de bastante interés que podrá potenciar sus aplicaciones en la industria de alimentos y farmacéutica principalmente.

## 5. Perspectivas

Si bien, los fructanos no modificados presentan limitantes de aplicación por su carácter hidrofílico conferido por los grupos OH, éstas pueden superarse mediante modificaciones estructurales que permitan potenciar sus propiedades fisicoquímicas y funcionales y con ello, incrementar el aprovechamiento de especies de agave y subproductos que promuevan la implementación y fortalecimiento de la economía circular, con mayores beneficios en zonas áridas mexicanas. Entre los principales métodos de modificación química explorados, la esterificación, parece ser el método que tienen el mayor potencial para futuros desarrollos, debido a las propiedades fisicoquímicas y funcionales obtenidas a través de estos tiene el potencial de aumentar la eficacia general de sistemas a base de biopolímeros como los fructanos tipo inulina y agavinas. Abre la posibilidad de producir una variedad de derivados modificados, que pueden impartir propiedades innovadoras, siendo versátiles en muchos campos de interés. Aunque no se ha estudiado mucho acerca de realizar una doble modificación, el resultado podría dar paso a nuevas aplicaciones fortaleciendo el efecto prebiótico que poseen los fructanos de agave y/o fracciones específicas de estos. Sobre estas bases, se espera que la modificación de fructanos de agave, por su estructura molecular, desarrolle mayores aplicaciones no solo en los sectores alimentarios y/o farmacéuticos sino también, en campos aún no explorados.

## 6. Conclusiones

Los derivados modificados de inulinas, se han usado principalmente en la administración de fármacos que son utilizados como emulsionantes para estabilizar nanopartículas lipídicas siendo mejor que algunos surfactantes. Se han utilizado como material encapsulante de fármacos, así como en la protección de compuestos bioactivos. En ámbitos industriales, los derivados de inulina se han utilizado en la estabilización de emulsiones y dispersiones. En el sector alimentario, se han obtenido derivados que son capaces de tener actividad antifúngica con algunos microorganismos patógenos, entre otras aplicaciones. Dado el potencial identificado con la modificación de fructanos tipo inulina y pese a que existen aún pocos estudios sobre modificación de fructanos de agave, se visualiza un gran campo de investigación para potenciar su uso, debido a que, al ser moléculas ramificadas, las propiedades tecno-funcionales son diferentes y podrían aprovecharse en diversos campos de investigación.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen al CONACyT-México por la beca de estudiante número 579982. Este capítulo es parte de los productos de colaboración de miembros (RIOB y MJF) de la Red Nacional de Agaves AGARED.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

## 7. Referencias

- Afinjuomo, F., Barclay, T. G., Song, Y., Parikh, A., Petrovsky, N., y Garg, S. (2019). Synthesis and characterization of a novel inulin hydrogel crosslinked with pyromellitic dianhydride. *Reactive and Functional Polymers*, 134, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2018.10.014>
- Aldrete-Herrera, P. I., López, M. G., Medina-Torres, L., Ragazzo-Sánchez, J. A., Calderón-Santoyo, M., González-Ávila, M., y Ortiz-Basurto, R. I. (2019). Physicochemical composition and apparent degree of polymerization of fructans in five wild agave varieties: Potential industrial use. *Foods*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/foods8090404>
- Apolinário A.C, Goulart de Lima Damasceno B. P, de Macêdo Beltrão N. E, Pessoa A., Converti A. y da Silva J.A. (2014). Inulin-type fructans: A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. *Carbohydrate Polymers*, 101, 368–378. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.081>
- Asawale, R.H., Meshram, J.H., Kumbhar, V.B., (2014). Solid lipid nanoparticles as drug delivery system: an overview, *Pharmacie Globale: International Journal of Comprehensive Pharmacy*: 5(1):1-10.
- Asogbon, A. O. y Akitayo, E. T. (2014). Recent trend in the physical and chemical modification of starches from different botanical sources: A review. In *Starch/Staerke* (Vol. 66, Issues 1–2, pp. 41–57). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/star.201300106>
- Caló, E., y Khutoryanskiy, V. (2015). Biomedical applications of hydrogels: A review of patents and commercial products. In *European Polymer Journal* (Vol. 65, pp. 252–267). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.024>
- Carranza, C. O., Fernandez, A. Á., Bustillo Armendáriz, G. R., y López-Munguía, A. (2015). Processing of Fructans and Oligosaccharides from Agave Plants. In *Processing and Impact on Active Components in Food* (pp. 121–129). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404699-3.00015-9>
- Castillo Andrade, A. I., Rivera Bautista, C., Godínez Hernández, C., Ruiz Cabrera, M. A., Fuentes Ahumada, C., García Chávez, E., y Grajales Lagunes, A. (2018). Physiometabolic effects of Agave salmiana fructans evaluated in Wistar rats. *International Journal of Biological Macromolecules*, 108, 1300–1309. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.043>
- Chen Y.F., Kaur L. y Singh J. (2018). Chemical Modification of Starch. En: In *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, (Malin Sjöö, Lars Nilsson eds.) Pp. 283–321. Woodhead Publishing, New Zealand. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100868-3.00007-X>.
- Considine, T., Patel, H. A., Anema, S. G., Singh, H., y Creamer, L. K. (2007). Interactions of milk proteins during heat and high hydrostatic pressure treatments - A Review. In *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (Vol. 8, Issue 1, pp. 1–23). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2006.08.003>
- Cunha, A. G., y Gandini, A. (2010). Turning polysaccharides into hydrophobic materials: A critical review. Part 2. Hemicelluloses, chitin/chitosan, starch, pectin and alginates. In *Cellulose* (Vol. 17, Issue 6, pp. 1045–1065). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9435-5>
- D'Ayala, G. G., Malinconico, M., y Laurienzo, P. (2008). Marine derived polysaccharides for biomedical applications: Chemical modification approaches. In *Molecules* (Vol. 13, Issue 9, pp. 2069–2106). <https://doi.org/10.3390/molecules13092069>
- Espinosa-Andrews, H., y Urias-Silvas, J. E. (2012). Thermal properties of agave fructans (Agave tequilana Weber var. Azul). *Carbohydrate Polymers*, 87(4), 2671–2676. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.053>
- Exerowa, D., Gotchev, G., Kolarov, T., Khristov, K., Levecke, B., y Tadros, T. (2007). Interaction forces in thin liquid films stabilized by hydrophobically modified inulin polymeric surfactant. 2. Emulsion films. *Langmuir*, 23(4), 1711–1715. <https://doi.org/10.1021/la062820g>
- García-Gamboa, R., Gradilla-Hernández, M. S., Ortiz-Basurto, R. I., García-Reyes, R. A., y González-Avila, M. (2020). Assessment of intermediate-and long-chains agave fructan fermentation on the growth of intestinal bacteria cultured in a gastrointestinal tract. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(2), 827–838. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio842>
- Gerschenson, N.L. Rojas A.M. y Fissore E.N (2017). Carbohydrates. En: *Nutraceutical and Functional Food Components*, (Charis M. Galanakis eds.), Pp.39-101. Academic Press, Argentina. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805257-0.00003-X>.

- Gübitz, G. M. y Paulo, A. C. (2003). New substrates for reliable enzymes: Enzymatic modification of polymers. In *Current Opinion in Biotechnology* (Vol. 14, Issue 6, pp. 577–582). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2003.09.010>
- Guggisberg, D., Cuthbert-Steven, J., Piccinali, P., Büti-kofer, U. y Eberhard, P. (2009). Rheological, micro-structural and sensory characterization of low-fat and whole milk set yoghurt as influenced by inulin addition. *International Dairy Journal*, 19(2), 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.07.009>
- Han, L., Ratcliffe, I. y Williams, P. A. (2015). Self-Assembly and Emulsification Properties of Hydrophobically Modified Inulin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(14), 3709–3715. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00333>
- Han, L., Ratcliffe, I. y Williams, P. A. (2017). Synthesis, characterisation and physicochemical properties of hydrophobically modified inulin using long-chain fatty acyl chlorides. *Carbohydrate Polymers*, 178, 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.008>
- Haq, F., Yu, H., Wang, L., Teng, L., Haroon, M., Khan, R. U., Mehmood, S., Bilal-Ul-Amin, Ullah, R. S., Khan, A. y Nazir, A. (2019). Advances in chemical modifications of starches and their applications. In *Carbohydrate Research* (Vol. 476, pp. 12–35). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.02.007>
- Heinze T, L. T. K. A. (2006). *Esterification of Polysaccharides* (Springer).
- Ignot-Gutiérrez, A., Ortiz-Basurto, R. I., García-Barra-das, O., Díaz-Ramos, D. I. y Jiménez-Fernández, M. (2020). Physicochemical and functional properties of native and modified agave fructans by acylation. *Carbohydrate Polymers*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116529>
- Jain, A. K., Sood, V., Bora, M., Vasita, R. y Katti, D. S. (2014). Electrospayed inulin microparticles for microbiota triggered targeting of colon. *Carbohydrate Polymers*, 112, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.05.087>
- Kalia S., A. (2011). *Biopolymers: Biomedical and Environmental Applications* (Hoboken). John Wiley & Scrivener.
- Kapusniak J. (2004). Thermal reactions of starch with long chain unsaturated Fatty acids - The way for the synthesis of products with new functional properties. *Starke/Starch*, 55.
- Karaki, N., Aljawish, A., Humeau, C., Muniglia, L. y Jasniewski, J. (2016). Enzymatic modification of polysaccharides: Mechanisms, Properties, And potential applications: A review. In *Enzyme and Microbial Technology* (Vol. 90, pp. 1–18). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2016.04.004>
- Kokubun, S., Ratcliffe, I. y Williams, P. A. (2018). The interfacial, emulsification and encapsulation properties of hydrophobically modified inulin. *Carbohydrate Polymers*, 194, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.018>
- Lawal, O. S., Storz, J., Storz, H., Lohmann, D., Lechner, D. y Kulicke, W. M. (2009). Hydrogels based on carboxymethyl cassava starch cross-linked with di- or polyfunctional carboxylic acids: Synthesis, water absorbent behavior and rheological characterizations. *European Polymer Journal*, 45(12), 3399–3408. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2009.09.019>
- Liu, Z., Jiao, Y., Wang, Y., Zhou, C. y Zhang, Z. (2008). Polysaccharides-based nanoparticles as drug delivery systems. In *Advanced Drug Delivery Reviews* (Vol. 60, Issue 15, pp. 1650–1662). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2008.09.001>
- López-Molina, D., Navarro-Martínez, M. D., Melgarejo, F. R., Hiner, A. N. P., Chazarra, S. y Rodríguez-López, J. N. (2005). Molecular properties and prebiotic effect of inulin obtained from artichoke (*Cynara scolymus* L.). *Phytochemistry*, 66(12), 1476–1484. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2005.04.003>
- Matros, A., Peukert, M., Lahnstein, J., Seiffert, U. y Burton, R. (2019). Determination of Fructans in Plants: Current Analytical Means for Extraction, Detection, and Quantification. In *Annual Plant Reviews online* (pp. 117–156). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0672>
- Meyer D. (2009). Inulin in *Handbook of Hydrocolloids* (Phillips G.O y Williams P.A, Ed.).
- Meyer, D., Bayarri, S., Tárrega, A. y Costell, E. (2011). Inulin as texture modifier in dairy products. *Food Hydrocolloids*, 25(8), 1881–1890. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.012>
- Minimol, P. F., Paul, W. y Sharma, C. P. (2013). PEGylated starch acetate nanoparticles and its potential use for oral insulin delivery. *Carbohydrate Polymers*, 95(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.021>
- Miramontes-Corona, C., Escalante, A., Delgado, E., Corona-González, R. I., Vázquez-Torres, H. y Toriz, G.

- (2020). *Hydrophobic agave fructans for sustained drug delivery to the human colon. Reactive and Functional Polymers*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.reactfuncpolym.2019.104396>
- Miramontes-Corona, C., Escalante, M. A., Delgado, E., Corona-González, R. I., Vázquez-Torres, H. y Toriz, G. (2019). *Characterization of modified agave fructans used as drug carriers to the colon by spectroscopy techniques*. 28. <https://doi.org/10.1117/12.2526135>
- Moreno-Vilet, L., Camacho-Ruiz, R. M. y Portales-Pérez, D. P. (2016). *Prebiotic Agave Fructans and Immune Aspects. In Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics: Bioactive Foods in Health Promotion (pp. 165–179). Elsevier Inc.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802189-7.00011-3>
- Mueller, M., Reiner, J., Fleischhacker, L., Viernstein, H., Loeppert, R. y Praznik, W. (2016). *Growth of selected probiotic strains with fructans from different sources relating to degree of polymerization and structure. Journal of Functional Foods*, 24, 264–275. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.04.010>
- Nonhlanhla Masina, Yahya E. Choonara, Pradeep Kumar, Lisa C. du Toit, Mershen Govender, Sunaina Indermun, y Viness Pillay. (2017). *A review of the chemical modification techniques of starch. Carbohydrate Polymers*. 157, 1226–1236.
- Ortiz-Basurto, R. I., Rubio-Ibarra, M. E., Ragazzo-Sanchez, J. A., Beristain, C. I. y Jiménez-Fernández, M. (2017). *Microencapsulation of Eugenia uniflora L. juice by spray drying using fructans with different degrees of polymerisation. Carbohydrate Polymers*. 175, 603–609. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.030>
- Ortiz-Basurto, R. I. Pourcelly, G., Doco, T., Williams, P., Dornier, M. y Belleville, M.-P. (2008). *Analysis of the Main Components of the Aguamiel Produced by the Maguey-Pulquero (Agave mapisaga) throughout the Harvest Period. Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(10), 3682–3687. <https://doi.org/10.1021/jf072767h>
- Peng, T. X., Liang, D. S., Guo, F., Peng, H., Xu, Y. C., Luo, N. P., Zhang, X. Y. y Zhong, H. J. (2019). *Enhanced storage stability of solid lipid nanoparticles by surface modification of comb-shaped amphiphilic inulin derivatives. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 181, 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.05.061>
- Petkova N., T. Tumbarski Y.D., Ivanov I.I. y Denev P.P. (2017). *Design of Inulin acetates with potential antimicrobial activity. Bulgarian Journal of Veterinary Medicine*, 20(1), 13–17.
- Roberfroid, M. y Slavin, J. (2000). *Nondigestible. Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40(6), 461–480. <https://doi.org/10.1080/10408690091189239>
- Rodríguez Furlán, L. T., Lecot, J., Pérez Padilla, A., Campderrós, M. E. y Zaritzky, N. (2012). *Stabilizing effect of saccharides on bovine plasma protein: A calorimetric study. Meat Science*, 91, 478–485. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.02.035>
- Rodríguez Furlán, L. T., Aldrete Herrera, P., Pérez Padilla, A., Ortiz Basurto, R. I. y Campderrós, M. E. (2014). *Assessment of agave fructans as lyoprotectants of bovine plasma proteins concentrated by ultrafiltration. Food Research International*, 56, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.12.014>
- Santiago-García, Patricia A., Mellado-Mojica, E., León-Martínez, F. M. y López, M. G. (2017). *Evaluation of Agave angustifolia fructans as fat replacer in the cookies manufacture. LWT - Food Science and Technology*, 77, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.028>
- Santiago-García, P.A. y López, M. G. (2014). *Agavins from Agave angustifolia and Agave potatorum affect food intake, body weight gain and satiety-related hormones (GLP-1 and ghrelin) in mice. Food and Function*, 5(12), 3311–3319. <https://doi.org/10.1039/c4fo00561a>
- Sosa-Herrera, M. G. y Delgado-Reyes, V. A. (2017). *Propiedades funcionales y aplicaciones tecnológicas de los fructanos. En: Alimentos Funcionales de Hoy. (M.E. Ramírez Ortiz (Eds.), OmniaScience. Pp. 97–116. OmniaScience. Barcelona.* <https://doi.org/10.3926/oms.357>
- Stevens C.V., Meriggi A. y Booten K. (2001). *Chemical modification of inulin, a valuable renewable resource, and its industrial applications. Biomacromolecules*. Spring;2(1):1–16. [10.1021/bm005642t](https://doi.org/10.1021/bm005642t).
- Tárrega, A., Rocafull, A. y Costell, E. (2010). *Effect of blends of short and long-chain inulin on the rheological and sensory properties of prebiotic low-fat custards. LWT - Food Science and Technology*, 43(3), 556–562. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.10.002>
- Tosh, B. y Ranjan Routray, C. (2014). *Grafting of Cellulose Based Materials: A Review. Chemical Science Review Letters*, (10), 74–92.



Tungland, B. (2018). Nondigestible Fructans as Prebiotics. in: Stacy Masucci. (Human Microbiota in Health and Disease, Ed.).

Tungland, B. C. y Meyer, D. (2002). Nondigestible oligo-and polysaccharides (dietary fiber): Their physiology and role in human health and food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 1(3), 90–109.

<https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2002.tb00009.x>

Walz, M., Hagemann, D., Trentzsch, M., Weber, A. y Henle, T. (2018). Degradation studies of modified inulin as potential encapsulation material for colon targeting and release of mesalamine. *Carbohydrate Polymers*, 199, 102–108.

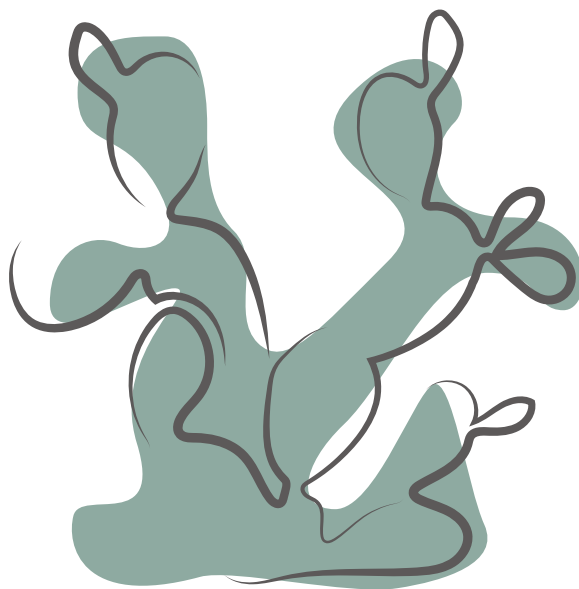
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.015>

Yang, L., Xia, Y., Tao, Y., Geng, H., Ding, Y. y Zhou, Y. (2018). Multi-scale structural changes in lintnerized starches from three coloured potatoes. *Carbohydrate Polymers*, 188, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.017>

Zhang, N., Chen, H., Ma, L. y Zhang, Y. (2013). Physical modifications of polysaccharide from *Inonotus obliquus* and the antioxidant properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 54(1), 209–215.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.12.030>

Zhang, Z., Jin, F., Wu, Z., Jin, J., Li, F., Wang, Y., Wang, Z., Tang, S., Wu, C. y Wang, Y. (2017). O-acylation of chitosan nanofibers by short-chain and long-chain fatty acids. *Carbohydrate Polymers*, 177, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.132>



# Aprovechamiento de residuos de nopal (*Opuntia ficus-indica*) para la producción de metano, como una alternativa en la producción de biogás

González-Hernández, Mary Carmen<sup>1</sup>

El-Kassis, Elie Girgis<sup>1\*</sup>

Argüelles-Hernández, Elizabeth<sup>1</sup>

Pérez-Armendáriz, Beatriz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Decanato de Ciencias Biológicas,  
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.  
Puebla México.

\*Correspondencia:  
eliegirgis.elkassis@upaep.mx +52 222 411 6216

En la actualidad los combustibles fósiles son la principal fuente de energía primaria en todo el mundo. Sin embargo, su uso ha generado un impacto ambiental, causando incluso daños a la salud humana. Esto ha impulsado a encontrar alternativas limpias y sustentables acorde a los recursos locales disponibles en México. Por lo tanto, usar la biomasa lignocelulósica como el nopal, representa una alternativa para la obtención de energía renovable. En esta investigación se evaluó el cladodio de nopal como sustrato lignocelulósico en diferentes proporciones con el estiércol bovino como inóculo para la obtención de metano, empleando frascos serológicos de 120 mL (pruebas de biotratibilidad). Se realizaron dos ensayos: en el primero se probaron tres relaciones sustrato/inóculo (1:1, 2:1 y 3:1) y en el segundo ensayo se probaron por porcentajes 15 y 20 % de nopal y 10 % de inóculo. Las variables de respuesta fueron la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales (ST), Sólido Suspendidos Volátiles (SSV) y pH. Se determinó la producción de metano por 17 y 10 días expresada como actividad metanogénica específica (AME). Además, se determinó la presencia de las bacterias y arqueas totales usando la técnica de PCR en tiempo real. Los resultados mostraron que en el primer ensayo la relación (3:1) presentó mayor porcentaje de remoción de DQO, ST y pH final de 6, obteniendo una AME de 2.1347 gDQO CH<sub>4</sub>/gSSV\*d. En el ensayo 2, la relación de 20 % nopal mostró una mayor reducción de DQO, ST y pH de 6.5. Se obtuvo una AME de 45.29 gDQO CH<sub>4</sub>/gSSV\*d y una alta presencia de bacterias y de Arqueas totales. El uso de residuos agroindustriales como fuente de producción de biogás puede ser una opción importante en México para sustituir un porcentaje de la energía eléctrica producida por combustibles fósiles.

**Palabras claves:** arqueas, biogás, *Opuntia ficus-indica*, sustrato lignocelulósico.

## Introducción

En la actualidad, los combustibles fósiles se han convertido en la principal fuente de energía primaria en todo el mundo. Su fuerte dependencia global ha provocado efectos adversos en el medio ambiente y en los seres humanos, disminuyendo la seguridad energética generando altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), entre otras emisiones contaminantes por la combustión de gas natural, carbón y derivados del petróleo, sin mencionar de accidentes y derrames de petróleo durante su extracción, transporte o refinación, entre otros problemas (Chu & Majumdar, 2012). Buena parte de los conflictos bélicos de los últimos decenios corresponde al

acceso de hidrocarburos, con respecto a la regulación de su precio, o por la apropiación de los arrendamientos petroleros. Estos conflictos sociopolíticos y ambientales, producidos principalmente por el cambio climático global, se han intensificado tanto que los gobiernos han propuesto como estrategia global la eliminación del uso de los combustibles fósiles a finales del siglo XXI. De modo que implica una transición energética radical, donde una parte crucial corresponde a las fuentes renovables de energía (FRE) y dentro de ellas, a la bioenergía (Alarcón Gutierrez *et al.*, 2016).

La matriz energética mundial se basa fundamentalmente en el uso de la energía fósil (petróleo, carbón y gas natural). En el año 2017, la matriz energética mundial estaba formada por un 78.4 % de combustibles fósiles y un 19.3 % de energía renovable en el consumo total final de energía (Renewable energy policy network for the 21st century, 2017). México desea acelerar su transición a las fuentes de energía renovables. No obstante, aún tiene un largo camino (Alarcón Gutierrez *et al.*, 2016). El país depende de un 91.6 % de los combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades de energía primaria (Alarcón Gutierrez *et al.*, 2016; Vázquez, 2015), de éstos el petróleo representa un 62 % de la demanda total, seguidos del gas natural con un 21.6 % y el carbón con un 4.4 %, lo que deja a las energías renovables con un 9.5 %, mientras que los condensados y energía nuclear representan un 1.0 % y 1.6 % respectivamente (SENER, 2017). Desde el siglo XX, en el país, el principal énfasis de investigación ha sido el centro de desarrollo de refinería basada en petróleo crudo, carbón y gas natural para explotar la materia prima fósil, disponible a bajo precio, para el desarrollo de la industria, producir productos múltiples y energía para satisfacer la creciente demanda de la población (Chandra *et al.*, 2012) todos ellos extinguidos en un futuro cercano, altamente contaminantes y utilizados en forma ineficiente (Severiche & Acevedo, 2013). Por tanto, la economía mexicana se ve afectada por el consumo excesivo de fuentes fósiles, mientras que la participación de la energía renovable en la matriz energética ha caído en lugar de incrementarse, lo que no es congruente con el gran potencial del territorio mexicano para su desarrollo (Vázquez, 2015).

Sin embargo, el país busca maneras eficientes de obtener energía a partir de desperdicios orgánicos (o biomasa, compuesta por desechos vegetales) (Chávez & Cerda, 2008). Entre las materias primas de interés, se encuentran los metabolitos primarios, que son hidratos de carbono (azúcar simple, celulosa, hemicelulosa, almidón, etc.) y lignina, también llamados materiales lignocelulósicos, que se pueden convertir en biocombustibles. La biomasa lignocelulósica es una materia prima abundante y renovable, sin embargo, sólo una pequeña parte puede ser utilizada en la práctica, incluyendo la



paja de cereales, paja de trigo, cáscara de arroz, mazorcas de maíz, rastrojo de maíz, bagazo de caña de azúcar, cáscaras de frutos secos e incluso las cosechas forestales y residuos de proceso de madera (Correa-Guimaraes, 2016).

En este sentido, el manejo correcto de la materia orgánica residual se ha logrado a través de diferentes tratamientos que implican el reciclaje del desecho, transformándolos en productos con valor agregado. El reciclaje de la materia orgánica ha recibido un fuerte impulso con el alto costo de los fertilizantes químicos, con la búsqueda de alternativas no tradicionales de energía, así como también, la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos. El consorcio bacteriano juega un importante rol en las transformaciones de estos residuos orgánicos especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células. Lo que permite establecer bioprocesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objetivo de tratar adecuadamente los diversos residuos orgánicos (Varnero Moreno, 2011).

La digestión anaerobia en específico, es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como “biogás” y a una suspensión acuosa o “lodo” que incluye a los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. La materia prima preferentemente utilizada para ser sometida a este tratamiento es cualquier biomasa residual que posea un alto contenido en humedad, como restos de comida, restos de hojas y hierbas al limpiar un jardín o un huerto, residuos ganaderos, lodos de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas y aguas residuales domésticas e industriales (Lorenzo-Acosta & Obaya-Abreu, 2005).

En la digestión anaerobia más del 90 % de la energía disponible por oxidación directa es transformada en metano, consumiéndose sólo un 10 % de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50 % consumido en la fermentación aeróbica. Dentro de la digestión anaerobia, los microorganismos metanogénicos desempeñan un rol en la función de enzimas respiratorias y, junto con las bacterias no metanogénicas, conforman una cadena alimentaria que tiene relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas (Varnero Moreno, 2011). El proceso se constituye de cuatro fases: la fase hidrolítica, fermentativa o acidogénica, acetogénica y metanogénica (Ventura-Ramos *et al.*, 2017).

Por otro lado, en México, el nopal (*Opuntia ficus-indica*) se usa de manera secundaria como alimento complementario para consumo animal, su venta es de baja rentabilidad y se desaprovechan los residuos de éste. Sin embargo, se consideran como gran potencial para sustentar proyectos rentables y promover el desarrollo agroindustrial en el país. Anteriores investigaciones han señalado que es posible la obtención de biogás a partir del cladodio de nopal, no obstante, aún no se ha indicado la garantía de ser un buen material metanogénico. Asimismo, se menciona que el pH de la pulpa es muy bajo, lo cual también afecta al desarrollo de las bacterias metanogénicas y por ende la producción de metano (Inglese *et al.*, 2018). De acuerdo a lo anterior, es importante y necesaria esta investigación, debido a los pocos estudios que se tienen acerca de las pruebas que determinen su biodegradación con métodos biotecnológicos como la digestión anaerobia, la dinámica y desarrollo de las bacterias metanogénicas al producir metano y de establecer condiciones óptimas que se requieren para el desarrollo de la digestión a partir de los cladodios de nopal y estiércol bovino. Además de poder contar con una reconversión productiva para aquellas regiones productoras de nopal en el país.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el cladodio de nopal como sustrato lignocelulósico a través de pruebas de biotratibilidad a escala laboratorio, para la producción de metano en la generación de energía y el aprovechamiento de los residuos agrícolas.

## 1. Materiales y métodos

### 1.1 Primer ensayo: relaciones en función de la DQO

Se utilizaron frascos serológicos como biorreactores, con una capacidad de 120 ml, con un volumen final de 80 ml. Dentro de este volumen se consideró un 5 % de la fase líquida y el 95 % fue sólida. La fase líquida fue un medio de cultivo con esta composición g/l: 0.27  $K_2HPO_4$ , 0.35  $KH_2PO_4$ , 0.53  $NH_4Cl$ , 0.075  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ , 0.1  $MgCl_2 \cdot H_2O$ , 0.02  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ; micronutrientes g/l: 0.5  $MnCl_4 \cdot H_2O$ , 0.01  $H_3BO_3$ , 0.03  $CuCl_2$ , 0.01  $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ , 0.01  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ , 0.05  $ZnCl_2$ , 0.05  $Na_2SeO_3$ , 0.02 Ac. Fólico y 0.001 resarzurina.

La selección de las cargas orgánicas se consideró entre los 1 500 mg de SSV/L y 3 000 mg de SSV/L de acuerdo con la metodología de Cendales (2011).

### 1.2 Segundo ensayo: relaciones en función de la DQO

En este ensayo se probaron mezclas de nopal y estiércol bovino dentro del rango de 15 y 20 % del sustrato para obtener mayor factibilidad de la presencia de metano ( $CH_4$ ) y disolución del nopal, de acuerdo a la metodología de Arbizu (2010). Se utilizaron frascos serológicos con una capacidad de 120 ml, con un volumen final de 80 ml de la mezcla.

### 1.3 Caracterizaciones fisicoquímicas

Se caracterizaron el sustrato y el inóculo de acuerdo a la TABLA 1, además se utilizaron como variables de respuesta en los biorreactores los métodos descritos en la misma tabla para los ensayos 1 y 2.

Tabla 1. Parámetros analizados del inóculo, sustrato y en los biorreactores de los ensayos 1 y 2

| Parámetro                  | Metodología de análisis                                                                            | Caracterización Sustrato e inóculo | Variables de respuesta, para cada Biorreactor en los dos ensayos |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Demanda química de Oxígeno | Método Hach 8000-Procedimiento con DR-2010-método de digestión de reactor/oxígeno, demanda química | x                                  | x                                                                |
| Sólidos Totales            | NMX-AA-034-SC-FI-2001/Método para la cuantificación de sólidos totales                             | x                                  | x                                                                |

|                               |                                                                                      |   |   |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---|---|
| Sólidos totales fijos         | NMX-AA-034-SC-FI-2001/Método para la cuantificación de sólidos totales fijos         | x | x |
| Sólidos totales volátiles     | NMX-AA-034-SC-FI-2001/Método para la cuantificación de sólidos totales volátiles     | x | x |
| Sólidos suspendidos totales   | NMX-AA-034-SC-FI-2001/Método para la cuantificación de sólidos suspendidos totales   | x | x |
| Sólidos suspendidos fijos     | NMX-AA-034-SC-FI-2001/Método para la cuantificación de sólidos suspendidos fijos     | x | x |
| Sólidos suspendidos volátiles | NMX-AA-034-SC-FI-2001/Método para la cuantificación de sólidos suspendidos volátiles | x | x |
| pH                            | NMX-AA-008-SCFI-2011/Determinación del pH                                            | x | x |
| % Humedad                     | NMX-N-100-SCFI-2009/Determinación de Humedad                                         | x |   |

#### 1.4 Pruebas de biotratabilidad para la determinación de CH<sub>4</sub>

La determinación del CH<sub>4</sub> se estableció por el método volumétrico, basado en la cuantificación del volumen de CH<sub>4</sub> producido, mediante el uso del desplazamiento de hidróxido de sodio (NaOH) al 10 %, con un pH de 12, esto se debe a la propiedad de reaccionar con el CO<sub>2</sub> presente en el biogás, permitiendo así una medición más aproximada del volumen de CH<sub>4</sub> que se produjo.

El montaje del equipo de medición consistió en botellas de suero, que contenían la solución de NaOH al 10 %; con equipos venoclisis conservando las válvulas para el control y manejo de los flujos de biogás y desplazamiento del NaOH y agujas hipodérmicas de entrada y salida que conectaban a los biorreactores y las botellas de suero

#### 1.5 Determinación de Arqueas totales y bacterias totales por PCR

Esta cuantificación se llevó a cabo en las muestras del ensayo 2. Se tomaron 200 g de muestras cada tercer día por duplicado, para identificar dinámica microbiana al inicio, intermedio y final en la prueba de biotratabilidad anaerobia. Todas las muestras colectadas se congelaron a -80 °C inmediatamente después de su toma, hasta la realización de la extracción de DNA. La extracción de DNA se realizó utilizando el kit ZR Fecal DNA Miniprep según las instrucciones del proveedor, Zymo Research. El equipo de PCR en tiempo real usado fue el Rotor-Gene Q 2PLX.

Para detectar presencia de arqueas y bacterias totales se llevó a cabo la amplificación del gen 16s rRNA por PCR en tiempo real usando los primeros descritos en la TABLA 2.

Tabla 2. Primers utilizados para la amplificación del 16s rRNA.

| Nombre  | Secuencia             | Dirección | Microorganismo | Tamaño |
|---------|-----------------------|-----------|----------------|--------|
| Archfw  | ATTAGATACCCSBGTAGTCC  | Forward   | Arquea         | 273 bp |
| Arcgrev | GCCATGCACCWCCTCT      | Reverse   |                |        |
| Bacfw   | ACTCCTACGGGAGGCAG     | Forward   | Bacteria       | 468 bp |
| Bacrev  | GACTACCAGGGTATCTAATCC | Reverse   |                |        |

## 2. Resultados y Discusión

### 2.1 Resultados primer ensayo

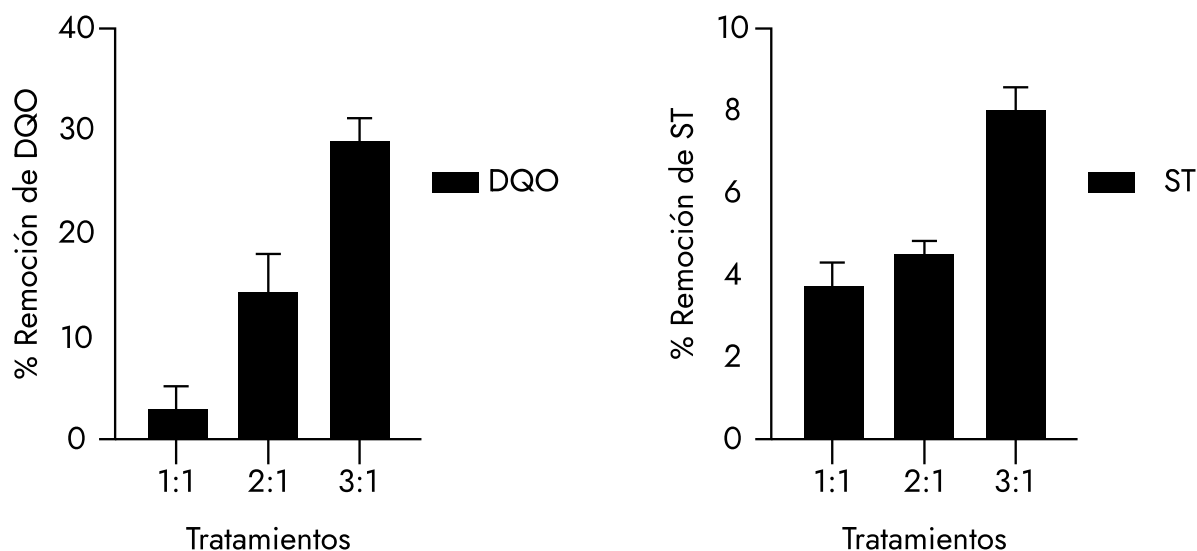
Uno de los análisis importantes que se observaron para su monitoreo en este tratamiento, fueron la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y pH. Con base en lo anterior, los resultados de DQO de las relaciones (1:1), (2:1) y (3:1) fueron de 906.5 mg/L, 934.5 mg/L y 1097 mg/L respectivamente. En ST para la relación (1:1) el resultado fue de 730 mg/L, mientras que en (2:1) fue de 845 mg/L y en (3:1) de 1020 mg/L. Por otra parte, los resultados de SSV en la relación (1:1) fue de 484 mg/L, para la relación (2:1) fue de 556 mg/L y por último para (3:1) fue de 604 mg/L. Además, el pH fue neutralizado, de un promedio original de las tres relaciones de 4.2 a 7.2 unidades de pH.

El tiempo de retención de la mezcla entre el sustrato (nopal) e inóculo (estiércol bovino) de este tratamiento fue de 17 días. De modo que hasta el día 17 se obtuvieron los resultados finales de los análisis fisicoquímicos. Por lo tanto, los resultados finales de DQO de las relaciones (1:1), (2:1) y (3:1) fueron de 878.33 mg/L, 828.67 mg/L y 760.67 mg/L respectivamente. Para ST finales, la relación de (1:1) fue de 705 mg/L, (2:1) se obtuvo 808.33 mg/L y (3:1) fue de 939.67 mg/L. En el caso de los SSV de (1:1), (2:1) y (3:1) fueron 385.33 mg/L, 436 mg/L y 457.33 mg/L respectivamente. Sin embargo, para pH, se obtuvieron resultados un poco bajos de 6 unidades. En la relación (1:1) se mostró un pH promedio de 5.3, y para (2:1) fue de 5.6 y finalmente para la relación (3:1) su pH promedio fue de 6 unidades. Cabe mencionar que autores como Buenrostro *et al.*, (2000) afirman que la digestión anaerobia es más eficiente con valores de pH cercanos a la neutralidad, sin embargo, Angelidaki *et al.* (2009) muestra en un estudio que esta digestión también se puede dar en un rango de pH entre 5.5 y 6.5 unidades. Y es que la variedad del pH también se debe a la presencia de los ácidos grasos volátiles (AGV), presentes durante las cuatro etapas de la digestión anaerobia, además el cladodio de nopal, que es lo que normalmente consumimos como verdura tiene un rango de pH entre 3 y 4 unidades. De acuerdo a los estudios fisicoquímicos realizados, se observó que cuanto más maduro

sea el cladodio menor es su pH, además, en un estudio bromatológico describen que la presencia de ácido ascórbico (vitamina C) va en aumento siempre y cuando la verdura sea más madura, de tal manera que, en ese momento se ignoraba esta información por lo cual su pretratamiento fue solamente mecánico, es decir, se prosiguió solo por molienda y regulación inicial de pH del sustrato.

En la *FIGURA 1* se observan los niveles de remoción en porcentaje que se obtuvieron de cada relación a partir de DQO y ST.

Figura 1. Remociones de A) DQO, y de B) de ST, en las diferentes proporciones utilizadas



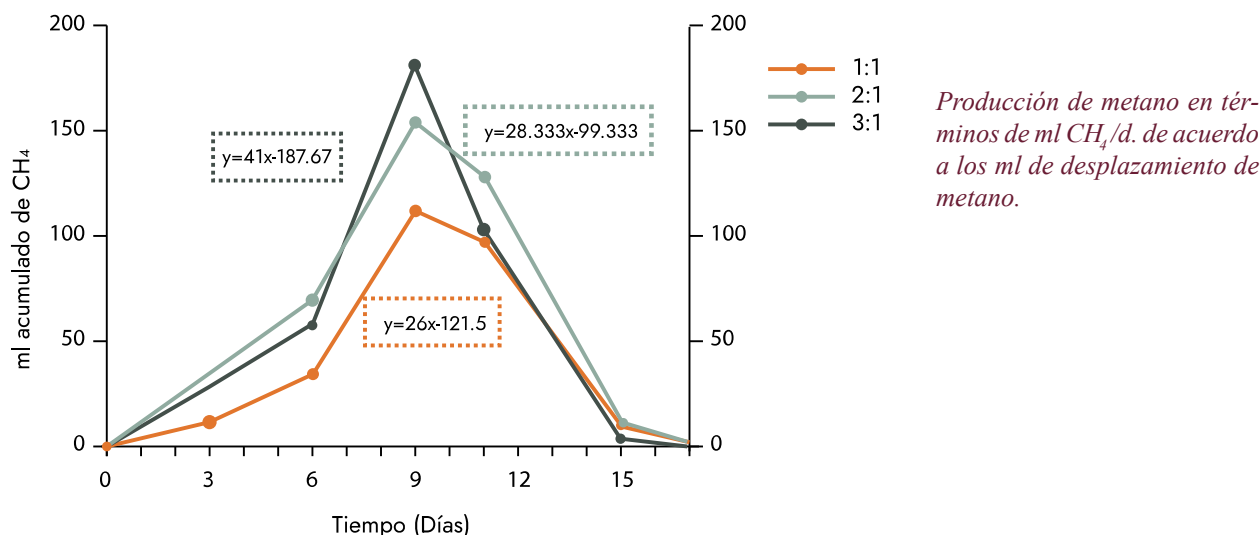
Estos resultados son indicadores de la realización de la digestión anaerobia a pesar de sus condiciones ácidas, y es que de acuerdo a Cendales (2010), la disminución de DQO permite confirmar la conversión del sustrato a biogás. De tal manera que los valores obtenidos de DQO final de cada relación se reflejan los porcentajes máximos de remoción donde la relación (1:1) presentó un resultado promedio de 3.11 %, mientras que (2:1) obtuvo un 14.04 % y finalmente en (3:1) fue de 29.06 %. Por otra parte, los ST de cada relación (1:1, 2:1, 3:1) presentaron valores porcentuales máximos de remoción de 3.42 %, 4.34 % y 7.88 % respectivamente. Por último, en los SSV la relación (1:1) obtuvo un porcentaje de remoción máximo de 30.70 %, en (2:1) se obtuvo un 27.81 % y finalmente en (3:1) fue de 24.28 %.

Si bien estos resultados mostraron bajos rendimientos en la remoción de nopal, nos permitieron analizar los estudios de Buenrostro *et al.* (2000) y Angelidaki *et al.* (2009), que concluyen que la presencia de los ácidos grasos volátiles (AGV) son parámetros que predicen la inestabilidad en la digestión anaerobia pues se encuentran altamente relacionados con la variación baja de pH y destacan la estabilidad del rendimiento en días posteriores, sin embargo, estas variaciones de pH ácido se mantiene, debido a la alta presencia constante de los ácidos grasos volátiles en todas las etapas de la digestión. En este sentido, sus resultados se vieron afectados en los primeros días, con un rendimiento bajo de producción de metano. Sin embargo, en los días 7 y 10, se observó la estabilidad de la digestión aumentando a 0.351 gr de SSV reportando un pH bajo, mientras que los ácidos grasos volátiles seguían en aumento. Buenrostro *et al.* (2009) concluye que es necesario el acondicionamiento del medio con alcalinizantes antes y durante la digestión para mayor rendimiento de metano.

### Determinación de la producción de CH<sub>4</sub>

De acuerdo a la FIGURA 2 se pueden observar los comportamientos de la producción de CH<sub>4</sub> acumulado (mL) en función del tiempo durante los ensayos de biotratabilidad para cada una de las relaciones estudiadas (1:1, 2:1 y 3:1).

Figura 2



Estas relaciones estudiadas permitieron hacer las estimaciones de la actividad metanogénica específica (AME) [TABLA 3], observando la capacidad de los microorganismos metanogénicos en biodegradar al nopal y la producción de biogás. En la relación (2:1) se obtuvo un valor menor que en la relación (1:1), esta diferencia, se obtuvo debido a la variación de pH y específicamente a la acidez producida por la conversión de la biomasa a ácidos grasos, como parte específica de la vía metanogénica (Angelidaki *et al.*, 2009).

Tabla 3. Comparación de resultados de producción de metano con Cendales (2011)

| Relación | Resultado de Nopal                                      |                                      | Resultados de Cendales                                       |                       |
|----------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|
|          | Producción de CH <sub>4</sub> (ml CH <sub>4</sub> /día) | AME (g DQO CH <sub>4</sub> /SSV·día) | Producción de CH <sub>4</sub> (g DQO CH <sub>4</sub> /L·día) | AME (g DQO/g SSV·día) |
| (1:1)    | 26                                                      | 1.69                                 | 23.1                                                         | 0.011                 |
| (2:1)    | 28.33                                                   | 1.60                                 | 42.2                                                         | 0.019                 |
| (3:1)    | 41                                                      | 2.13                                 | 67.5                                                         | 0.03                  |



En la *TABLA 3* se hace una comparación de los resultados de este estudio con los de Cendales (2011) con una similitud en el incremento de la producción de metano de acuerdo a las relaciones de cada carga orgánica (1:1, 2:1 y 3:1). No obstante, nuevamente la relación (2:1) en los resultados de este estudio no obtuvo un mayor incremento significativo en la producción de metano, de modo que la AME también se encontró afectada. Sin embargo, para Cendales (2011) este tipo de características se deben a la presencia de ácidos grasos volátiles, lo cual implica que la producción de metano se retrase. En el estudio de Cendales se mantuvo el pH cercano a la neutralidad hasta la finalización la digestión anaerobia.

## 2.2 Resultados del segundo ensayo

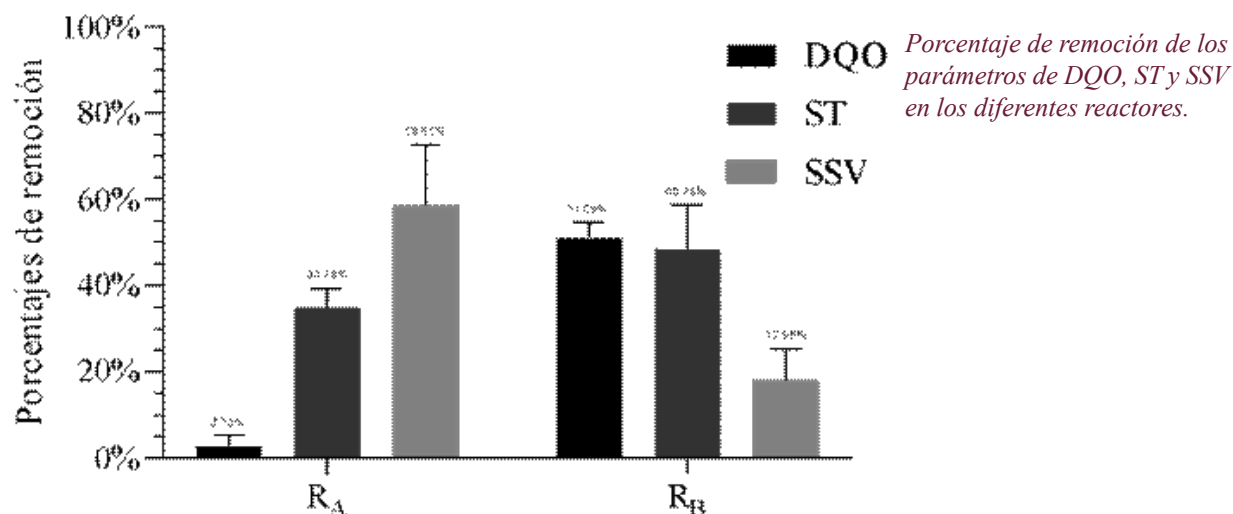
El monitoreo de cada parámetro en T2 fueron constantes, tomando en cuenta que en el primer día de digestión se hicieron las caracterizaciones iniciales y siguiendo los monitoreos en los días tres, seis y diez, en este último se tomaron los resultados como caracterizaciones finales. Es importante considerar que la estabilidad del biorreactor requiere de varios días por lo que se tienen fluctuaciones en los parámetros estudiados. Las muestras para la carga de 15 % y 20 % se representan en  $R_A$  y  $R_B$  respectivamente.

Los resultados promedios de SSV para  $R_A$  en el día cero fue de 101.33 mg/L, en el día seis aumentó a 116.67 mg/L y en el día diez disminuyó a 42 mg/L. Para  $R_B$  en los días cero, seis y diez fueron 78 mg/L, 91.67 mg/L y 64 mg/L respectivamente.

Tanto en  $R_A$  como en  $R_B$ , en el día cero se ajustó su pH a 7.5 unidades. En el día tres el pH en  $R_A$  y  $R_B$  fue de 6.1 y 5.7 respectivamente; en el día seis  $R_A$  tuvo 5.8 y  $R_B$  6.3; y finalmente en el diez  $R_A$  subió a 6.4, mientras que  $R_B$  su pH fue de 6.5. Es preciso mencionar, que en los días tres y seis de monitoreo el pH se ajustó a 7.4, para ajustarse a las mejores condiciones de la digestión.

El comportamiento de los resultados promedio de DQO en  $R_A$  y  $R_B$ ; en  $R_A$  se observó un aumento en los días tres y seis, debido al proceso de estabilidad del biorreactor, por lo que hasta el día diez mostró una disminución significativa de 143 mg/L. En  $R_B$ , también se mostró variación en la DQO, no obstante, esto solo se reflejó en el día tres. Contando en el día cero con un resultado promedio de 244 mg/L, y al día diez los resultados promedio fueron de 136.33 mg/L y 119.33 mg/L respectivamente. En los ST este comportamiento también se observó, en el caso de  $R_A$ , los resultados promedios de los días cero, fueron de 153.33 mg/L y al día diez fue de 100 mg/L. Para  $R_B$  en el día cero se obtuvo 203.33 mg/L, y en el día diez 105 mg/L (*FIGURA 3*).

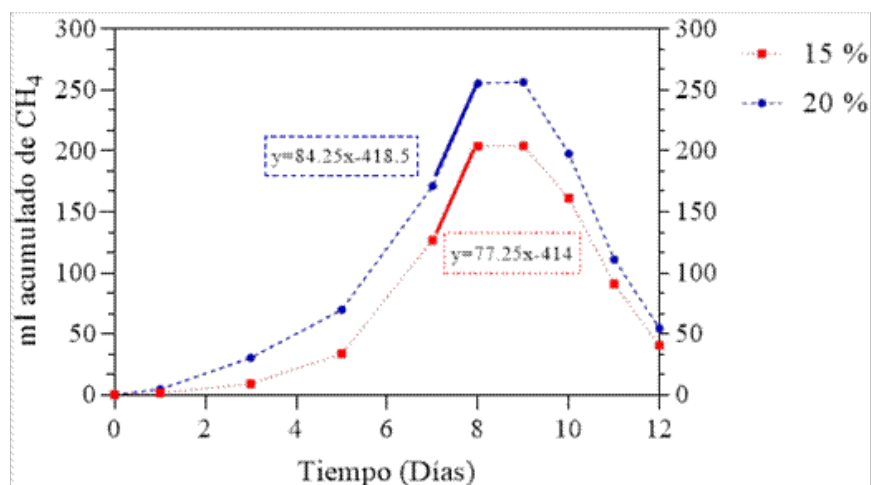
Figura 3



### Determinación de metano en los Biorreactores

La producción de metano fue bajo en el inicio, debido al proceso de estabilidad de los biorreactores, en específico de las bacterias metanogénicas; sin embargo, conforme transcurrió el tiempo el biorreactor se adaptó al sustrato empleado, bajo las diferentes condiciones de esta investigación probadas. En el día diez se obtuvo una disminución drástica de la DQO, y una producción de  $\text{CH}_4$  significativa. En la FIGURA 4 se muestra que  $R_A$  obtuvo 77.25 ml  $\text{CH}_4$ /día y  $R_B$  una producción de 84.25 ml  $\text{CH}_4$ /día. Este porcentaje de producción de metano a la concentración del 20 % de nopal (p/V) coincide con lo reportado por Arvizu (2010), donde concluye que también obtuvo una mayor producción de  $\text{CH}_4$  con los porcentajes 15 % y 20 %. En la producción de metano calculado de la AME,  $R_A$  obtuvo 31.97 g DQO/g SSV·día y en  $R_B$  fue de 45.29 g DQO/g SSV·día. De este modo, se comprueba que el alto resultado de AME en  $R_B$  dedujo que los microorganismos metanogénicos del inóculo en su mayor porcentaje se desarrollaron y biodegradaron en su máxima capacidad.

Figura 4



Producción de metano en términos de ml  $\text{CH}_4$ /d. de acuerdo a los ml de desplazamiento de metano.

### 2.3 Determinación de la abundancia de arqueas totales y bacterias totales por PCR.

Durante las estimaciones de arqueas por PCR en tiempo real de los días estudiados en  $R_A$  y  $R_B$  se evidenció la presencia de arqueas y bacterias totales de acuerdo a la Concentración/Ct.

Los resultados de la presencia de bacterias totales y arqueas totales están relacionadas a los cambios de pH (*FIGURA 5 Y TABLA 4*). Existen pocos estudios que evidencian a través de pruebas moleculares la afectación de los microorganismos por el pH en biorreactores anaerobios.

Tabla 4. Presencia de Bacteria totales y Arqueas totales de acuerdo al pH

| Tiempo (Días) | pH $R_A$ | Concentración/Ct $R_A$ de Bacterias totales | pH $R_B$ | Concentración/Ct $R_B$ de Bacteria totales |
|---------------|----------|---------------------------------------------|----------|--------------------------------------------|
| 0             | 7.5      | 6.54                                        | 7.5      | 7.09                                       |
| 3             | 6.1      | 3.20                                        | 5.7      | 3.08                                       |
| 6             | 5.8      | 4.04                                        | 6.3      | 3.63                                       |
| 10            | 6.4      | 3.08                                        | 6.5      | 4.44                                       |
| Tiempo (Días) | pH $R_A$ | Concentración/Ct $R_A$ de Arqueas totales   | pH $R_B$ | Concentración/Ct $R_B$ de Arqueas totales  |
| 0             | 7.5      | 4.13                                        | 7.5      | 4.91                                       |
| 3             | 6.1      | 2.14                                        | 5.7      | 2.28                                       |
| 6             | 5.8      | 2.98                                        | 6.3      | 2.75                                       |
| 10            | 6.4      | 2.39                                        | 6.5      | 3.31                                       |

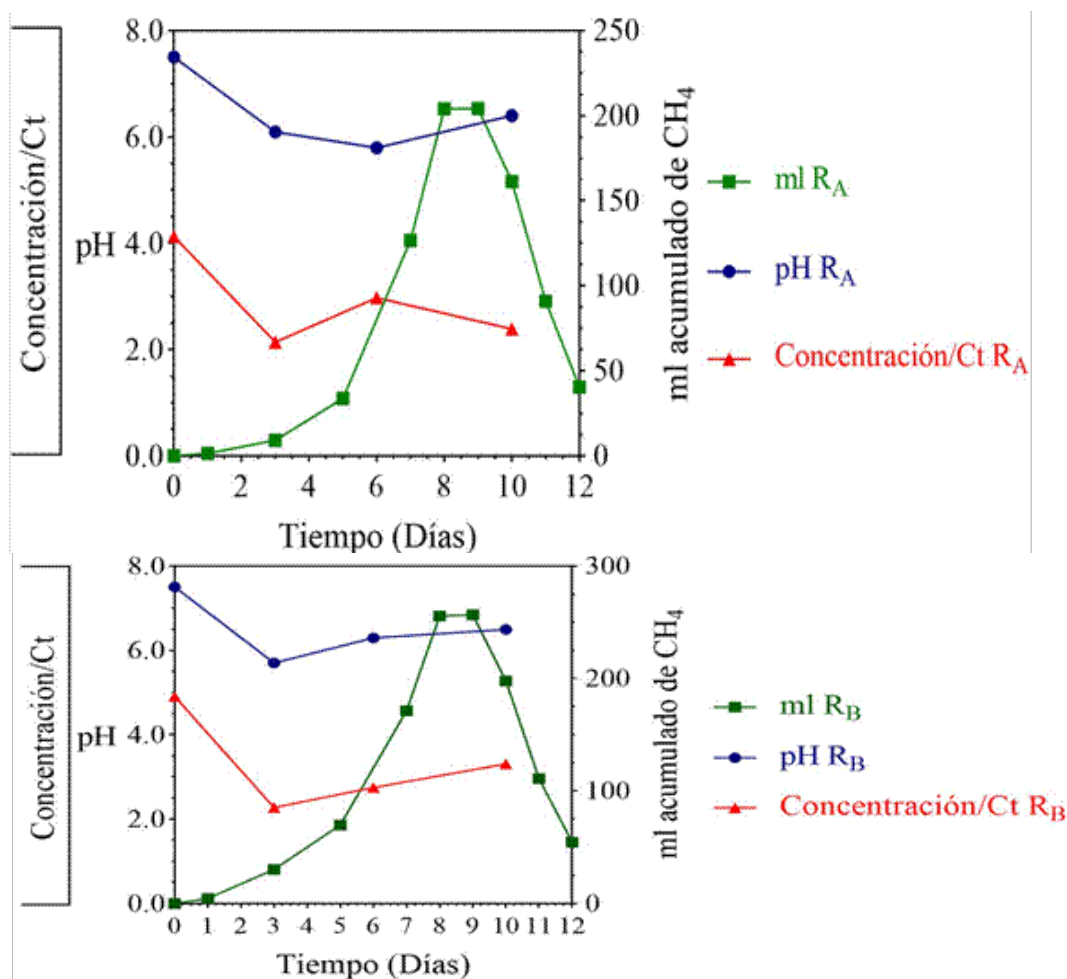
Como parte importante de esta investigación era mostrar el aprovechamiento de residuos agrícolas como los cladodios de nopal, en esta investigación se mostró que es posible la colonización de microorganismos responsables de la digestión anaerobia para la producción de metano. La complejidad de aislar y cultivar microorganismos anaerobios, genera un reto el tener tecnologías de fácil operación y aprovechar estos sustratos, por lo que las herramientas moleculares ofrecen una alternativa de monitoreo a las poblaciones microbianas, responsable de degradar estos sustratos y generar biogás.

Si bien, la AME es utilizada comúnmente para monitorear la calidad de inóculo y permite cuantificar la máxima capacidad de producción de metano (Torres-Lozada & Pérez, 2010), el estudio de PCR en este segundo ensayo permitió evidenciar la presencia de metanogénicas. En la *TABLA 4*, se hallan las concentraciones altas de las bacterias y arqueas totales inicialmente, pero en los días posteriores el cambio de pH afectó la concentración de ambos parámetros, disminuyendo su cantidad, no obstante, la constante intervención por establecer el pH en neutro, benefició la concentración final, hallándose más alta que en los días 3 y 6.

De igual manera, el cambio de estos parámetros (pH y concentración de bacterias y arqueas totales), establecen una la curva de la producción de metano acumulado diario. En las *FIGURA 5* se observan que la concentración de las bacterias arqueales tanto en  $R_A$  y  $R_B$  a pesar de su pequeña variación en los días 3 y 6 no afectaron significativamente a la producción de metano, incluyendo entre los días

3, 5 y 9 de la curva de ml acumulados (se observa su escala) mientras que la concentración ct de las arqueas gradualmente se recupera y se establece hasta el día 10. Por lo tanto, las AME de ambos biorreactores ( $R_A$  y  $R_B$ ) se vieron favorecidas, siendo  $R_B$  el de mayor resultado como se describe en la sección 3.2.

Figura 5. Dinámica de la presencia de Arqueas totales y la evaluación de pH. A  $R_A$ , B  $R_B$



### 3. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, la producción de biogás en el primer ensayo no fue la óptima. Esto se debe a que solamente se ajustó su pH en el inicio, sin embargo, durante la digestión anaerobia no se agregaron más alcalinizantes en los biorreactores. Además, el biorreactor de la relación (2:1) presentó resultados menos favorables en la producción de biogás y AME. La relación de los ácidos grasos volátiles acumulados y pH ácido que Angelidaki *et al.*, (2009) y Buenrostro *et al.*, (2000) mencionan, concluyen que estas condiciones conducen a un bajo rendimiento en la producción de metano.

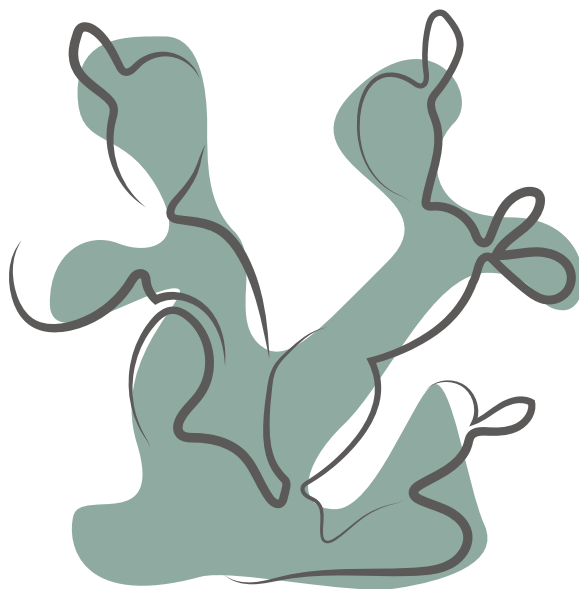
En el segundo ensayo, la dinámica de la cantidad de arqueas y bacterias totales se encontraron estrechamente relacionados con el pH. Esto quiere decir, que para  $R_A$  y  $R_B$  que mostraban una cantidad (Concentración/Ct) de arqueas y bacterias totales alta en un pH inicial de 7.5, fueron disminuyendo en los días siguientes, observándose cambios en ambas determinaciones. Sin embargo, el ajuste de

pH contribuyó a la estabilización de la digestión anaerobia. En los días 6, 9 y 10, la cantidad de los microorganismos y el pH se estabilizaron, lo que permitió observar que de acuerdo al descenso de la cantidad de arqueas y bacterias totales, estas se encontraban en un periodo de adaptación al medio en los biorreactores. Esto permite concluir que, de acuerdo al objetivo de este proyecto de investigación, es posible contribuir a la economía circular utilizando residuos agroindustriales para la generación de energía, como una tecnología emergente. En  $R_A$  y  $R_B$ , no se encontró una diferencia significativa de producción de metano ni de la cantidad de arqueas y bacterias totales, pues la variación de porcentajes de inóculo usado no fue tan diferente, por lo que pueden ser candidatas a utilizar para hacer pruebas a nivel piloto. Además, el estiércol bovino utilizado para la inoculación de los biorreactores favoreció la calidad y rendimiento en la producción de metano y alta reproducción de arqueas y bacterias totales registrados en los estudios de PCR.

## 4. Referencias

- Alarcón Gutierrez, E., Alatríste Mondragón, F., Amaya Pérez, L., Barahona Pérez, L., Buitrón Méndez, G., Carrillo Reyes, J., Medoza Puga, L. E. (2016). Estado del Arte de la bioenergía en México. En C. A. Cerutti (Ed.). SENER.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., ... van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, 59(5), 927–934. doi:10.2166/wst.2009.040
- Arvizu Fernández, J.L. (2015). Producción de Biogás con nopal. *Tendencia Tecnológica*, 64-72.
- Buenrostro, O., Cram, S., Bernache, G., & Bocco, G. (2000). La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 16(1), 19-26.
- Cendales Ladino, E. D. (2011). Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1462–1476.
- Chávez, M., & Cerda, A. (2008). La energía renovable ya está aquí (No. 6). Ideas para el Cambio. México.
- Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488(7411), 294–303. <https://doi.org/10.1038/nature11475>
- Correa-Guimaraes, A. (2016). Aprovechamiento de residuos lignocelulosicos para producción de biocombustibles y bioproductos TESIS DOCTORAL: Presentada por Viviane da Silva Lacerda para Jesús Martín-Gil. Universidad de Valladolid. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4262.7042>
- Inglese, P., Mondragón Jacobo, C., Nerfzaoui, A., & Sáenz, C. (Edits.). (2018). Ecología del cultivo, manejo y sus usos del nopal. México: Organización de agricultura y alimentación.
- Lorenzo-Acosta, Y., & Obaya-Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar, 39(1), 35–48. <https://doi.org/0138-6204>
- Renewable energy policy network for the 21st century. (2017). Avanzando en la transición mundial hacia la energía renovable. México: REN21. Retrieved from [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/07/17-8399\\_GSR\\_2017\\_KEY-FINDINGS\\_Spanish\\_lowres.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/07/17-8399_GSR_2017_KEY-FINDINGS_Spanish_lowres.pdf)
- Torres-Lozada, Patricia., & Pérez, Andrea. (2010). Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 9(1), 5-14.
- SENER. (2017). Balance nacional de energía. México: Dirección General de Planeación e Información Energéticas.

- Severiche, C. A., & Acevedo, R. L. (2013). *Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación*. *INGENIUM - Revista de La Facultad de Ingeniería*, 28(28), 6–15. <https://doi.org/10.21500/01247492.1330>
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. (M. de Energía, Ed.) (1st ed.). Santiago de Chile: Global Environment Facility.
- Vázquez, A. L. (2015). *Desarrollo y prospectivas de energía renovable en México*. *Economía Informa*, 390, 132–135. [https://doi.org/10.1016/S0185-0849\(15\)30010-4](https://doi.org/10.1016/S0185-0849(15)30010-4)
- Ventura-ramos, J. A., Moreno-Perez, E., Lopez-Velarde, M., & Perez-Moreno, V. (2017). *Obtención de biogás a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante la digestión anaerobia mesofílica*. *Revista de energía química y física*, 4(12), 34–43.





# Aprovechamiento de tallos de cebolla y cáscara de tuna para la obtención de compuestos bioactivos

Jaime-Patlán, Mariana<sup>1</sup>

Patlán-González, Jeniffer Shaaron de Jesús<sup>1</sup>

Gómez-Salazar, Julián Andrés<sup>1</sup>

Cerón-García, Abel<sup>1</sup>

Osorio-Mora, Oswaldo<sup>2</sup>

Sosa-Morales, María Elena<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Posgrado en Biociencias, Departamento de Alimentos, Universidad de Guanajuato, Irapuato, Gto., México.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Nariño, Pasto, Nariño, Colombia.

\* Correspondencia: MESM, ORCID ID: 0000-0002-1197-2572, msosa@ugto.mx; Tel. 462 624 1889 ext. 5219

**Resumen:** Los desechos de frutas y hortalizas y sus subproductos se generan en grandes cantidades como resultado de su procesamiento industrial. Pueden representar una grave amenaza para el medio ambiente si no se aprovechan adecuadamente. Por otro lado, estos subproductos pueden ser ricos en compuestos bioactivos, que se consideran benéficos a la salud. En los últimos años, se han realizado esfuerzos considerables para desarrollar técnicas de reutilización o valorización de los desechos vegetales. En el presente trabajo, se secaron con aire caliente tallos de cebolla y cáscaras de tuna roja con el fin de estabilizarlos y cuantificar su contenido de biocompuestos. Se usó un secador tipo túnel con una resistencia eléctrica de 2000 W, equipado con un ventilador de 170 W y un caudal de aire de 233 m<sup>3</sup>/h a diferentes temperaturas. Los compuestos fenólicos fueron determinados con el reactivo de Folin-Ciocalteu y medidos a 765 nm. Los flavonoides fueron extraídos con metanol al 80 % y reacción con cloruro de aluminio y acetato de potasio para medirlos a 415 nm. Además, se cuantificó clorofila en tallos de cebolla y betalaínas y antocianinas en cáscara de tuna. Se obtuvieron las cinéticas de secado, el coeficiente de difusión para tallos de cebolla presentó un rango de  $3.33 \times 10^{-8}$  a  $1.39 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s de 40 a 60°C, mientras que, en cáscara de tuna, fue de  $3.21$  a  $8.73 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s de 65 a 85°C. En tallos de cebolla secos, se obtuvieron fenólicos: 8.0-9.7 mg EAG/g, flavonoides 45.2-72.1 mg rutina/g y clorofila de 0.86-1.58 mg/g. En cáscara de tuna seca, se tuvieron fenólicos: 18.0-27.0 mg EAG/g, flavonoides 9.0-21.33 mg rutina/g, betalaínas 0.12-0.70 mg/g, y antocianinas 2.3-22.8 mg cianidina-3-glc/g. El secado con aire es un método sencillo y de bajo costo que permite estabilizar los residuos de tallos de cebolla y cáscara de tuna roja para obtener biocompuestos de interés.

**Palabras claves:** biocompuestos, cáscaras de tuna, secado con aire caliente, tallos de cebolla.



## Introducción

Los desechos de frutas, hortalizas y sus subproductos se consideran uno de los más grandes problemas a resolver para el sector agrícola y alimentario mundial en el siglo XXI (Esparza *et al.*, 2020), y de gran importancia en los países en desarrollo debido a sus impactos negativos en el medio ambiente. Estos desechos se generan en grandes cantidades como resultado del procesamiento industrial. Pueden representar una grave amenaza para el medio ambiente si no se utilizan adecuadamente (Pal y Jadeja, 2019). Por otro lado, son ricos en compuestos bioactivos, los cuales han sido reconocidos por su efecto beneficioso sobre la salud. En los últimos años, se han realizado

esfuerzos considerables para desarrollar técnicas que eviten el desperdicio de alimentos, así como para reutilizar o valorizar los desechos de frutas y verduras en la industria alimenticia (Fernández *et al.*, 2018).

La industria agroalimentaria genera cantidades significativas de subproductos que se desperdician, como lo es el caso de la cebolla (Milea *et al.*, 2019). Durante su procesamiento, casi el 37 % del total de cebollas frescas son consideradas como desperdicio sin ningún uso (Sharman *et al.*, 2016). Los subproductos de cebolla contienen cáscaras, raíces, la base y cuello de los bulbos, tallos, hojas y también bulbos dañados (Pal y Jadeja, 2019). Extraer compuestos bioactivos de los subproductos de la cebolla aparte de reducir los desperdicios que dañan el medio ambiente, constituyen una alternativa, para su aprovechamiento como antioxidantes naturales. Las hojas suelen estar maltratadas, pero la parte que las une al bulbo, tallo (también llamada cebollín, tallo falso, cuello u hojas no engrosadas), tiene un sabor suave y es una fuente de clorofilas.

Por otro lado, los subproductos de la tuna también son un material vegetal de interés. En México se conocen casi 300 especies del género *Opuntia*. Sin embargo, hasta ahora solo de 10 a 12 son utilizadas por el hombre, destacando en la producción de fruta *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. xocanostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*. Como especies silvestres: *Opuntia hyptiacantha*, *O. leucotricha* y *O. robusta*. Los nombres comunes con que son conocidas estas variedades son: tuna de agua, tuna fina, tuna blanca, tuna castilla, tuna cardona, tuna taponá (Sáenz, 2006). La tuna roja (*Opuntia streptacantha*), es una de las más producidas y consumidas en México; es jugosa y dulce, pero poco resistente para su manejo y de fácil descomposición, lo que impide su comercialización a gran escala (Reyes-Agüero *et al.*, 2005; Aquino-Bolaños *et al.*, 2012). La cantidad de desechos que se genera de la cáscara es alta. Sin embargo, estos desechos también contienen biocomponentes, los cuales pueden ser utilizados en la industria alimentaria. Los compuestos bioactivos de la cáscara de tuna roja son compuestos con actividad antioxidante como los polifenoles, flavonoides, betaxantinas y betacianinas (Tesoriere *et al.*, 2004).

Finalmente, es importante resaltar el carácter altamente perecedero de los desechos vegetales y con ello la pérdida de los compuestos biológicos de interés. El tratamiento de secado podría ser un método eficaz para aumentar la vida útil de los subproductos vegetales al ralentizar el desarrollo de microorganismos y prevenir reacciones bioquímicas que puedan modificar la composición y funcionalidad de los compuestos bioactivos de esos subproductos, permitiendo así el uso integral de ingredientes funcionales, antioxidantes y aromatizantes (Liu *et al.*, 2019). También, el secado puede

reducir el peso (concentración de los compuestos nutricionales) y volumen, así como la disminución de costos de empaque, transporte y almacenamiento (Ren *et al.*, 2017).

El presente capítulo presenta los resultados experimentales para estabilizar residuos vegetales (tallos de cebolla y cáscara de tuna roja) por el método de secado convectivo con aire caliente, utilizando un secador tipo túnel para ser pulverizados y caracterizados en cuanto a su contenido de biocomponentes.

## 1. Materiales y Métodos

### 1.1 Obtención de residuos

Los tallos de cebolla blanca (*Allium cepa* L., variedad Cirrus) y las cáscaras de tuna roja (*Opuntia streptacantha*) fueron obtenidos de materiales de desecho de la central de abastos de Irapuato, Gto, México. Cada uno de estos residuos, fueron generados el mismo día de su recolección, por lo que solamente fue verificado que no se incluyera material en descomposición. Finalmente, los residuos vegetales fueron lavados con agua potable previo a su procesamiento.

### 1.2 Secado de residuos

#### 1.2.1 Proceso de secado con aire caliente

Los tallos de cebolla se cortaron en rodajas con espesor de 6.4 mm, las cáscaras de tuna roja fueron cortadas en tiras de 0.5 cm de ancho. Las dimensiones del material vegetal se obtuvieron utilizando un vernier (Mitutoyo, Japón). Se pesaron  $500 \pm 2$  g y  $70 \pm 2$  g de muestra, respectivamente, y se colocaron en una charola perforada para realizar el secado utilizando un secador tipo túnel (diseñado y fabricado en la Universidad de Guanajuato) con una resistencia eléctrica de 2000 W, equipado con un ventilador de 170 W y un caudal de aire de  $233 \text{ m}^3/\text{h}$ . El proceso de secado se llevó a cabo utilizando tres temperaturas para las rodajas de tallos de cebolla (40, 50 y  $60^\circ\text{C}$ ) y cuatro temperaturas (65, 75, 80 y  $85^\circ\text{C}$ ) para las tiras de cáscara de tuna roja. Se registró la pérdida de peso de cada lote de cáscara de tuna cada 20 min y para los tallos de cebolla cada 15 min, mediante el uso de una balanza digital (VELAB balances, modelo VE-5000).

Las temperaturas de bulbo húmedo o seco se midieron cada 20 min con un termómetro de mercurio y se calculó la humedad relativa durante el proceso de secado. La velocidad del aire fue de  $2.27 \pm 0.04 \text{ m/s}$ , registrada con ayuda de un anemómetro (AIRFLOW, modelo TA3, China). Posterior al secado, las muestras deshidratadas se pulverizaron durante 0.5 min con la ayuda de una licuadora de uso doméstico (Osterizer Blender, modelo BLSTBC4129-013, México).

### 1.2.2 Cálculos de difusividad másica durante el secado

Para el cálculo de la difusividad de la humedad se utilizó la ecuación de difusión de la segunda ley de Fick considerando las muestras con geometría de lámina (*ECUACIÓN 1*):

$$MR = \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{1}{(2n+1)^2} \right) \exp \left( - \left( (2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t \right) / 4L^2 \right) \quad (1)$$

donde  $D_{eff}$  es la difusividad de humedad efectiva ( $m^2/s$ ),  $t$  es el tiempo (s), el espesor medio de la muestra ( $m$ ) y  $n$  es un número entero positivo. Se tomó  $n=1$  para los cálculos.

## 1.3 Determinación de compuestos bioactivos

Se realizó una extracción previa, mediante maceración de la muestra seca utilizando 10 ml de metanol al 80 % para compuestos fenólicos totales, flavonoides totales y betalainas. En cuanto a la cantidad de muestra a someter para la extracción, se usaron 0.2 g de muestra seca o 1.0 g de muestra fresca. En el caso de la extracción de antocianinas y clorofila, el metanol fue sustituido por acetona fría. Todas las determinaciones se hicieron por triplicado.

### 1.3.1 Determinación de compuestos fenólicos totales

A partir del extracto obtenido de la maceración, una alícuota de 10 ml fue clarificada por centrifugación a 14,000 rpm durante 10 min (Hermle, modelo: 22331, Hamburg GmbH) y posteriormente, se llevó a cabo la mezcla de reacción utilizando: 0.25 ml del extracto mencionado anteriormente, 0.25 ml de reactivo de Folin-Ciocalteu diluido 1:4 y 2.0 ml de carbonato de sodio al 1.0 %; se dejaron reposar durante 1 h en oscuridad. Posteriormente, con ayuda de un espectrofotómetro (Perkin Elmer, modelo: Lambda XLS, España) se midió la absorbancia a una longitud de onda de 765 nm; para el blanco se sustituyó la muestra por metanol al 80 %. Se utilizó una curva estándar de ácido gálico para determinar la concentración de compuestos fenólicos totales (Slinkard y Singleton, 1977).

### 1.3.2 Determinación de flavonoides totales

Se realizó una hidrólisis con metanol al 80 % durante 1 h en un baño de agua en ebullición. Los hidrolizados fueron enfriados y clarificados por centrifugación a 14,000 rpm durante 10 min. Se realizó la mezcla de reacción utilizando: 0.25 ml del extracto clarificado, 0.05 ml de cloruro de aluminio al 10 %, 0.05 ml de acetato de potasio 1 M, 1.0 ml de metanol al 80 % y 1.0 ml de agua. Se midió la absorbancia con un espectrofotómetro a una longitud de onda de 415 nm, para el blanco se sustituyó la muestra por metanol. Se utilizó una curva estándar de rutina para determinar la concentración de flavonoides totales (Khanam *et al.*, 2012).

### 1.3.3 Determinación de antocianinas totales

De acuerdo a Pasko *et al.*, (2009), se llevó a cabo la determinación de antocianinas totales por la técnica de pH diferencial, donde se preparó un buffer de borato de sodio 0.1 M con dos valores de pH, el primero fue pH=1.0 ajustado con ácido clorhídrico concentrado y el segundo, a 4.5 ajustado con ácido acético. Para determinar el pH se utilizó un potenciómetro digital (Hanna instruments HI 2550, Rumania). Posteriormente, se realizó la mezcla de reacción utilizando: 0.5 ml del extracto de cáscara de tuna y 2 ml de borato de sodio

0.1 M a pH de 1.0 o pH de 4.5, para medir la absorbancia, se utilizaron dos longitudes de onda, 515 y 700 nm, para el blanco se sustituyó la muestra por acetona fría. La concentración en la cáscara de tuna se determinó con la ECUACIÓN 2.

$$\text{Concentración de antocianinas} = ((\Delta \text{ absorbancia}) (\text{PM}) (\text{FD}) (1000)) / \epsilon \quad (2)$$

donde:  $\Delta$  Absorbancia=diferencial de absorbancia obtenido a 515 y 700 nm, PM=peso molecular de la antocianina, FD=factor de dilución y  $\epsilon$ =coeficiente de extinción molar (29,600 cianidina 3-glucósido).

#### 1.3.4 Determinación de betalaínas

A partir del macerado de cáscara de tuna, se recuperó el sobrenadante (8 ml), el cual fue aforado a 10 ml con metanol al 80 % y se centrifugó a 14,000 rpm durante 10 min. Posteriormente, se midió la absorbancia del sobrenadante recuperado a tres longitudes de onda: 537 nm (para betanina), 476 y 600 nm (vulgaxantinas-1); para el blanco se sustituyó la muestra por metanol al 80 %. Finalmente, la determinación de las concentraciones se realizó utilizando las Ecuaciones 3, 4 y 5 (Nilsson, 1970).

$$\text{Betaninas: } A_{\text{total}} = 1.095 * (A_{537} - A_{600}) \quad (3)$$

$$\text{Vulgaxantinas- 1: } A_{\text{total}} = (-0.258 * A_{537}) + A_{476} - (0.742 * A_{600}) \quad (4)$$

$$\text{Concentración de betalaínas} = (A_{\text{total}} * \text{FD} * \text{PM} * \text{V}) / (\epsilon * \text{P} * \text{L}) \quad (5)$$

dónde: Atotal=es la absorbancia total de cada tipo de betalaína, FD=Factor de dilución, PM=peso molecular de las betaninas y vulgaxantina-1 (551.48 y 339.3 g/mol respectivamente), V=volumen de la alícuota (ml),  $\epsilon$ =coeficiente de extinción molar de las betaninas y vulgaxantina-1 (1120 y 750 l/mol\*cm, respectivamente), P=peso de muestra (g), y L=longitud de la celda (cm).

#### 1.3.5 Determinación de clorofila

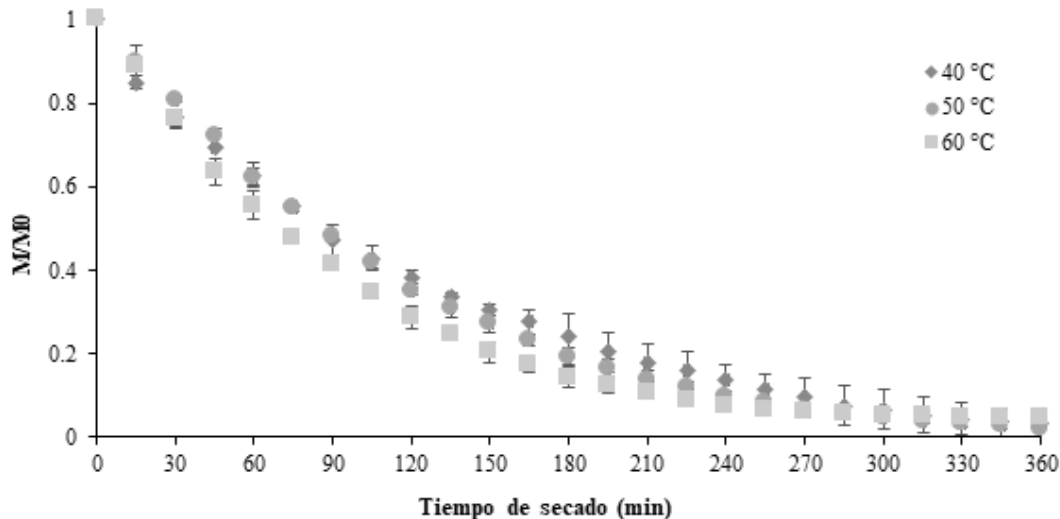
Las muestras de tallos de cebolla fueron trituradas junto con 10 ml de acetona al 80 %. El extracto se recopiló en microtubos y se centrifugaron a 10,000 rpm durante 10 min. Se recolectó el sobrenadante y se midió absorbancia con un espectrofotómetro a 664 nm para clorofila a y 647 nm para clorofila b. Los resultados fueron expresados como mg de clorofila sobre g de muestra (mg Chl/g) (Ziegler y Egle, 1965).

## 2. Resultados y Discusiones

### 2.1 Curvas de secado y coeficientes difusionales

En la *FIGURA 1* se presentan las cinéticas de secado de los tallos de cebolla bajo diferentes condiciones (40, 50 y 60 °C).

Figura 1. Cinética de secado de tallos de cebolla para temperaturas de 40, 50 y 60 °C



En todos los tratamientos de secado, se observa una mayor deshidratación de las muestras durante los primeros 150 min de tratamiento, siendo este el período de velocidad de secado constante. Seguido se observa el descenso de la velocidad de secado, en donde la muestra llega a la humedad crítica, por lo que la deshidratación de los tallos de cebolla es más lenta. Estos resultados son acordes a los obtenidos por Román *et al.* (2020). Respecto al efecto de la temperatura sobre el contenido de agua en los tallos de cebolla, se observa una mayor pérdida de agua con el incremento de la temperatura. A tratamientos de 60 °C, las muestras perdieron mayor contenido de agua, principalmente durante los primeros 180 min de secado. El equilibrio en el contenido de humedad se alcanza luego de 360 min de secado, para todas las temperaturas.

En la *TABLA 1* se muestran los valores del coeficiente de difusión del agua para las cinéticas de secado de los tallos de cebolla y cáscaras de tuna roja.

Tabla 1. Coeficientes de difusión másica del agua en tallos de cebolla y cáscaras de tuna roja secados con aire caliente

| Residuo vegetal      | Temperatura (°C) | Coeficientes de difusión ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) ( $\pm\text{SD}$ ) | R <sup>2</sup> |
|----------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------|
| Tallos de cebolla    | 40               | $1.01 \times 10^{-7} \pm 3.70 \times 10^{-9}$                         | 0.978          |
|                      | 50               | $1.30 \times 10^{-7} \pm 2.63 \times 10^{-8}$                         | 0.985          |
|                      | 60               | $1.53 \times 10^{-7} \pm 2.18 \times 10^{-8}$                         | 0.978          |
| Cáscara de Tuna roja | 65               | $3.21 \times 10^{-9} \pm 3.6 \times 10^{-11}$                         | 0.879          |
|                      | 75               | $3.86 \times 10^{-9} \pm 5.7 \times 10^{-10}$                         | 0.876          |
|                      | 80               | $8.20 \times 10^{-9} \pm 1.9 \times 10^{-9}$                          | 0.972          |
|                      | 85               | $8.73 \times 10^{-9} \pm 1.7 \times 10^{-9}$                          | 0.917          |

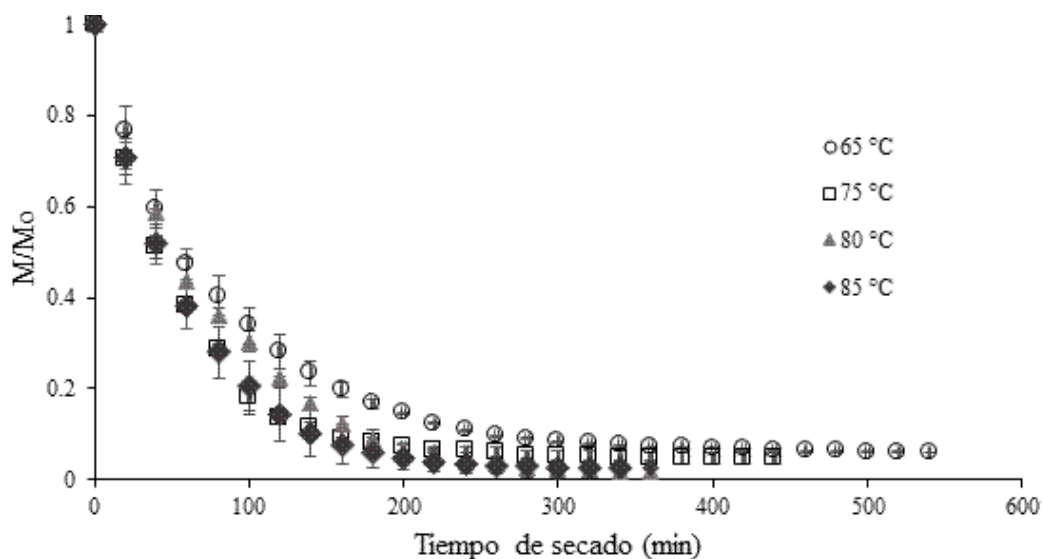
Para los tallos de cebolla secados con aire caliente a 40, 50 y 60 °C, a medida que incrementa la temperatura aumenta el coeficiente de difusión del agua. Los valores del coeficiente de difusión son acordes a las curvas de secado de la *FIGURA 1*. Al comparar las curvas, se observa una mayor inclinación de la pendiente para el período de velocidad de secado constante cuando se aumenta la temperatura, lo cual indica el incremento de la velocidad de salida del agua en las muestras de cebolla con la temperatura. Este fenómeno es debido al gradiente de temperatura entre el aire de secado y las rodajas de cebolla, el cual aumenta la transferencia de calor superficial produciendo el incremento de la presión de vapor y en consecuencia, se genera una mayor movilidad y tasa de evaporación del agua (Roman *et al.*, 2020). Los valores del coeficiente de difusión de humedad para las muestras de tallos de cebollas son mayores a los reportados por Demiray *et al.* (2017), quienes estudiaron el secado convectivo de láminas de cebolla a diferentes temperaturas (50, 60 y 70 °C). Los autores obtuvieron valores del coeficiente de difusión para el agua entre  $3.49 \times 10^{-8}$  a  $9.4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , valores que se encuentran en el mismo orden de magnitud, pero ligeramente mayores a los reportados en este estudio. Estas diferencias en el coeficiente de difusión pueden deberse al efecto de la estructura del tejido. La movilidad del agua dentro de un sólido es una función de la estructura física y la temperatura (Chandramohan, 2020), por lo que, en el tallo de la cebolla siendo una estructura rígida, se limitaría la difusividad del agua. Igualmente, otros parámetros que pueden afectar el coeficiente de difusión del agua son el grosor y contenido inicial de humedad de las muestras, su tiempo al tratamiento y la velocidad del aire de secado (Román *et al.*, 2020).

En la *FIGURA 2* se presentan las cinéticas de secado de la cáscara de tuna roja con las cuatro condiciones de secado. Estas curvas siguen una reducción exponencial del contenido de humedad en las muestras. Inicialmente, la humedad fue decreciendo continua y rápidamente con el tiempo de secado durante los primeros 160 min, siendo este el período de velocidad de secado constante. Seguido, esta pérdida de agua se produce a menor velocidad cuando el tejido llega a su contenido de humedad crítica. Este fenómeno se produce debido a la accesibilidad del agua superficial en las cáscaras de tuna y su posterior difusión para mantener la tasa de secado constante al inicio, resultando en una mayor difusión de la humedad y en consecuencia, en una alta velocidad de secado.

Al incrementar la temperatura de secado se aumenta la deshidratación de las muestras. El secado a 85 °C presenta los valores adimensionales de la humedad más bajos y con el menor tiempo de proceso.



Figura 2. Cinéticas de secado de cáscara de tuna roja para temperaturas de 65, 75, 80 y 85 °C



En la *TABLA 1* se observa el efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión del agua para cáscaras de tuna roja. Al aumentar la temperatura los valores del coeficiente de difusión del agua aumentan y el tiempo de secado disminuye. Estos resultados son acordes a lo reportado por otros autores (Mosqueda *et al.*, 2016). El incremento de los valores del coeficiente de difusión se relaciona con las cinéticas de secado representadas en la *FIGURA 2*. Comparando las tres curvas, el período de velocidad constante presenta una mayor inclinación cuando se aumenta la temperatura de secado y con ello las muestras alcanzan su contenido de agua crítico con mayor rapidez. En este período, la velocidad de transferencia de masa y calor en el interior de la muestra determinan la difusividad del agua y su disponibilidad en la superficie de evaporación (Chandramohan, 2020).

Respecto a los valores del coeficiente de difusión obtenidos en el presente estudio, estos fueron menores a los obtenidos por Mosqueda *et al.* (2016), con un rango entre  $8.65 \times 10^{-7}$  y  $2.45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  para el secado de muestras de jitomate y nopal, respectivamente. Los resultados se atribuyen generalmente al efecto de la estructura de la muestra sobre la velocidad de salida del agua. Una vez que la muestra ha alcanzado el contenido de humedad crítica, se inicia el descenso de la velocidad de secado, con lo cual la difusión del agua dependerá de los cambios estructurales o químicos del material y su porosidad (Chandramohan, 2020). Igualmente, los resultados obtenidos en este proyecto son cercanos a los reportados por Vega *et al.* (2007), para el secado de pimienta roja. Los autores obtuvieron valores entre  $6.9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  secando a  $60^\circ\text{C}$  y  $11.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  secando a  $80^\circ\text{C}$ . Wang *et al.* (2007) deshidrató puré de manzana a  $75^\circ\text{C}$  y  $85^\circ\text{C}$  y también obtuvo coeficientes de difusión similares a los presentados en este estudio, con valores de  $6.80 \times 10^{-9}$  y  $7.08 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectivamente. Mwithiga y Olwal (2005), deshidrataron col mediante secado por aire caliente usando cuatro temperaturas, para el cual obtuvieron un rango de  $14.88 \times 10^{-10}$  a  $55.94 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , el valor del coeficiente de difusión fue menor al obtenido en este trabajo. Las diferencias con los estudios descritos se deben a la cantidad de agua presente en cada alimento y su disponibilidad. El agua está presente en un sólido en forma libre y ligada, durante el proceso de secado de un alimento habitualmente se considera que la humedad eliminada es la que se encuentra libre, la que está débilmente unida al sólido (Román *et al.*, 2020). Otros factores que también afectan en la variación del coeficiente de difusión son la

humedad y temperatura inicial de la muestra, forma geométrica del producto, contracción, contenido de humedad en el equilibrio y velocidad del aire de secado (Chandramohan, 2020).

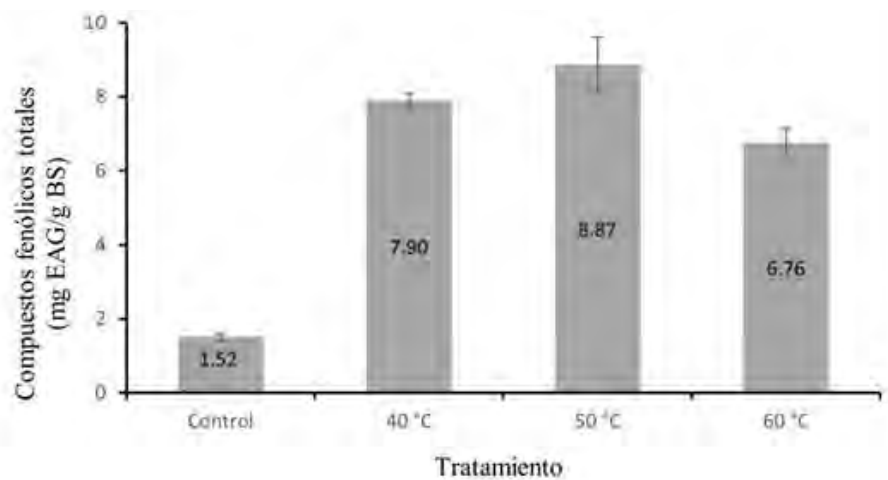
## 2.2 Compuestos bioactivos en tallos de cebolla deshidratados

En la *FIGURA 3* se muestra la gráfica de las concentraciones de compuestos fenólicos totales (CFT) reportados como mg EAG/g BS, en la que se puede observar que el secado tuvo un efecto favorable sobre estos compuestos, ya que al eliminar gran parte de la humedad de los tallos de cebolla no se aprecia el efecto de dilución en la concentración. Luego del proceso de secado, la concentración de estos compuestos es mayor con respecto a las diferentes temperaturas de secado en comparación al control. Se presentaron diferencias significativas para el nivel de compuestos fenólicos totales entre las temperaturas de secado ( $p \leq 0.05$ ), obteniendo valores de  $7.903 \pm 0.18$ ,  $8.868 \pm 0.73$  y  $6.757 \pm 0.37$  mg EAG/g BS para las temperaturas de secado de 40, 50 y 60 °C, respectivamente; también hubo diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre las condiciones de secado y la muestra fresca ( $1.51 \pm 0.08$  mg EAG/g BS). Se observó que el secado con aire caliente a 50 °C logra concentrar el contenido de CFT, pero a temperaturas moderadamente elevadas (60 °C) puede comenzar a degradarlos.

Loredana *et al.* (2019), reportaron concentraciones de  $6 \pm 0.01$  y  $8.2 \pm 0.006$  mg EAG/g BS para bulbos de las variedades de cebolla Montoro y Alife, respectivamente. Ren *et al.* (2017), reportaron valores de  $10.48 \pm 0.48$  mg EAG/g BS en bulbos de cebolla Red Baron secada con aire caliente a 60 °C, es una concentración mayor a la obtenida en este estudio. Sin embargo, cabe mencionar que en el estudio realizado por Ren *et al.* (2017) utilizaron fertilizantes en las cebollas como un medio de enriquecimiento. Sehrawat y Nema (2018), obtuvieron una concentración de  $6.24 \pm 1.51$  mg EAG/g BS en láminas de bulbos de cebolla secada con aire caliente a 60 °C, una concentración menor a la reportada en este estudio. Con lo anterior, es posible concluir que los subproductos de tallos de cebollas evaluados en esta investigación presentan valores significativos y comparables con otros estudios.

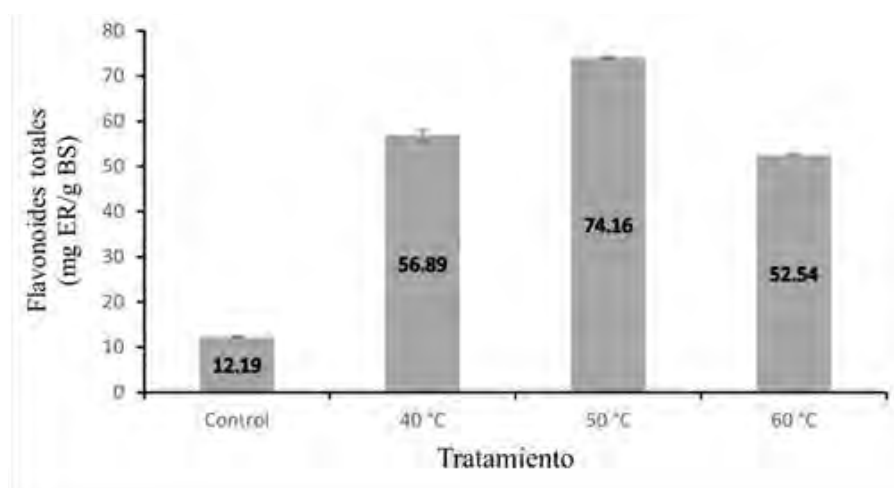
Figura 3. Concentración de compuestos fenólicos totales (CFT, expresado en mg EAG/g BS) en tallos de cebolla fresca y deshidratada.

Las literales diferentes indican diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ )



La FIGURA 4 muestra las concentraciones de flavonoides totales (FT) en los tallos de cebolla frescos y deshidratados bajo diferentes temperaturas de secado. Estos resultados presentaron un comportamiento similar a los compuestos fenólicos totales, es decir, el proceso de secado con aire caliente logra concentrar los FT. Los valores obtenidos entre tratamientos presentaron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ), siendo el tratamiento a 50 °C el que presentó el valor máximo de concentración de FT ( $74.159 \pm 0.19$  mg ER/g BS), mientras que a 60 °C se obtuvo la menor concentración de estos biocomponentes ( $52.542 \pm 0.3$  mg ER/g BS). La muestra fresca, tuvo el valor de concentración más bajo ( $12.186 \pm 0.21$  mg ER/g BS). Las temperaturas moderadamente altas (60 °C) al igual que en los CFT, degradan a los FT. Milea *et al.* (2019), reportaron valores de  $55.27 \pm 2.47$  mg ER/g BS, en extractos de cáscaras de cebolla amarilla que fueron secadas a 40 °C, valores muy similares a los obtenidos en el producto deshidratado obtenido por el secado a 60 °C.

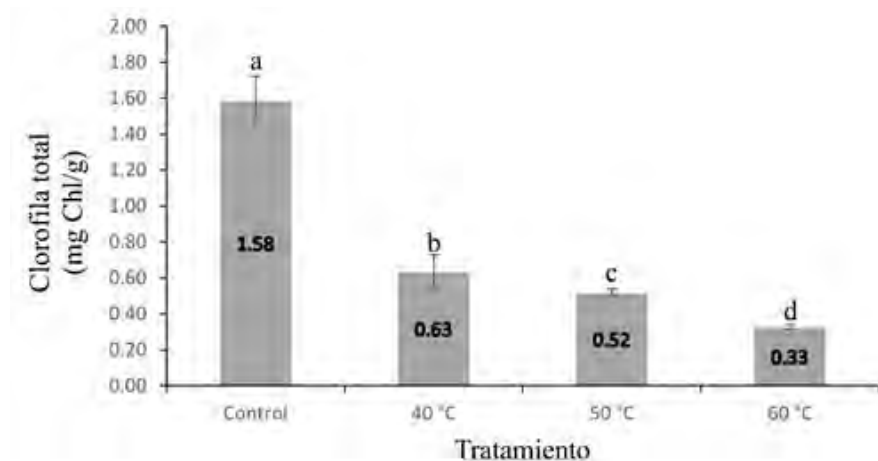
Figura 4. Concentración de flavonoides totales (FT, expresado en mg ER/g BS) en tallos de cebolla fresca y deshidratada. Las literales diferentes indican diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ )



Para el caso de la clorofila, el comportamiento fue contrario al de CFT y FT, es decir que los tratamientos de secado afectaron considerablemente el contenido de clorofila en los tallos de cebolla. Esto se puede observar en la FIGURA 5, donde la muestra fresca presentó los valores máximos de clorofila ( $1.584 \pm 0.13$  mg Chl/g), mientras que los valores obtenidos después del proceso de secado fueron los más bajos. El efecto de las temperaturas de secado para clorofila sigue el mismo comportamiento que para CFT y FT, a temperaturas de secado moderadamente altas (60 °C) la degradación de la clorofila es mayor con un valor de  $0.325 \pm 0.01$  mg Chl/g, con respecto al control.

Yuasa *et al.* (2020), determinaron el contenido de clorofila en hojas de dos cultivares de cebolla: Super-up y Kazusa No. 13, obteniendo valores de clorofila de 0.4328 y 0.3665 mg Chl/g, respectivamente. En otro estudio realizado por Stajner y Varga (2003), evaluaron el contenido de clorofila en diferentes especies *Allium* y obtuvieron una concentración de clorofila de 1.9 mg Chl/g para *Allium cepa* L. (cebolla), valor muy similar al obtenido para los tallos de cebolla frescos, por lo que se puede concluir que el proceso de secado afecta fuertemente a este biocompuesto, debido a la degradación térmica de estructura de la clorofila y la consecuente formación de productos de degradación como las feofitinas (Yuasa *et al.*, 2020), que no fueron evaluados en este estudio.

Figura 5. Concentración de clorofila (Chl, expresada en mg Chl/g) en tallos de cebolla fresca y deshidratada. Las literales diferentes indican diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ).



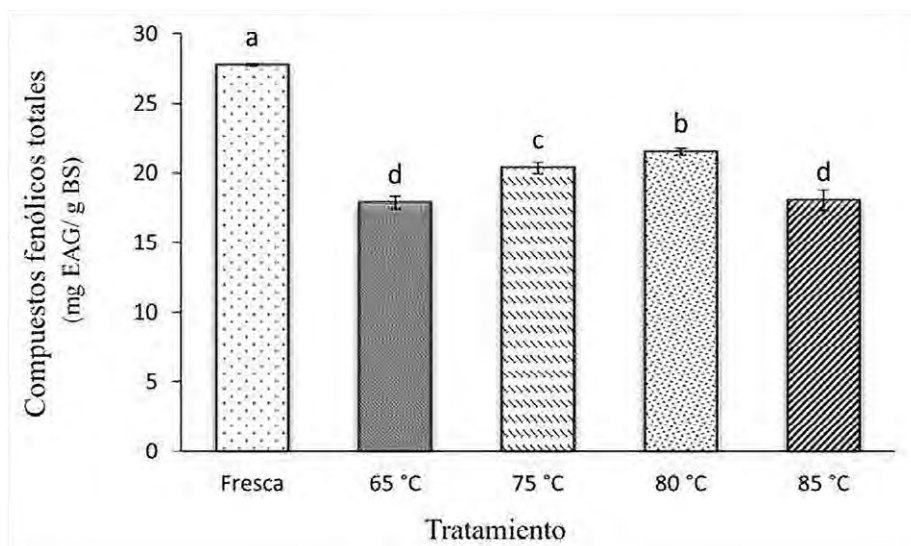
## 2.2 Compuestos bioactivos en cáscara de tuna roja deshidratada

En la FIGURA 6 se muestra la gráfica de las concentraciones de compuestos fenólicos totales reportados como mg equivalentes de ácido gálico/g base seca (mg EAG/g BS), en la que se puede observar que el secado tuvo un efecto adverso sobre los compuestos bioactivos. Luego de aplicar el proceso de secado, la concentración de estos compuestos disminuyó, mientras que la muestra control mostró valores de 27.73 mg EAG/g BS de cáscara, seguida de la cáscara de tuna roja secada a 80 y 75 °C, mientras que las muestras secadas a 85 y 65 °C, presentaron los menores valores en compuestos fenólicos totales.

Es importante resaltar que el tiempo de secado no fue el mismo para cada temperatura (esto debido, a que el proceso de secado finalizó cuando la muestra alcanzó la humedad en equilibrio), por lo tanto, los resultados indican que al aumentar el tiempo y la temperatura de secado se presentan mayores pérdidas de compuestos fenólicos totales.

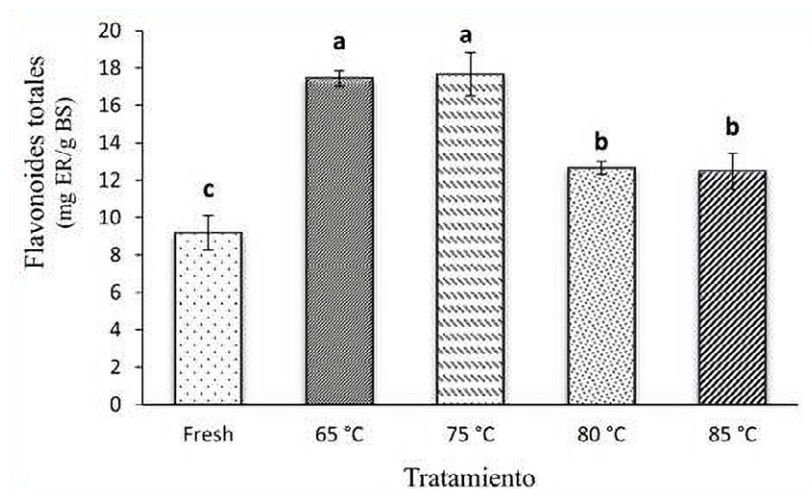
Este comportamiento de disminución de compuestos fenólicos totales por el efecto de la temperatura es similar al reportado por Nóbrega *et al.* (2015), quienes trabajaron con residuos de acerola, un fruto muy común en Brasil, y sus resultados muestran que al realizar el proceso de secado con aire caliente de dichos residuos hubo una disminución de casi el 70 % de los compuestos fenólicos totales al obtener valores de aproximadamente 100 mg EAG/g BS en cáscara fresca y entre 26.0-31.0 mg EAG/g BS para el residuo deshidratado.

Figura 6. Concentración de compuestos fenólicos totales (expresada en mg EAG/g BS) en cáscara de tuna roja fresca y seca. Las literales diferentes indican diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ )



La FIGURA 7 describe las concentraciones de flavonoides totales, en esta se muestran los resultados con comportamiento contrario que los compuestos fenólicos totales, es decir, se presentó un mayor valor de concentración en la cáscara deshidratada comparada con la cáscara fresca. La cáscara secada a 75 °C presentó el máximo valor de concentración (18.86 mg equivalentes de rutina/g BS de cáscara), este valor fue muy cercano al resultado obtenido con la cáscara secada a 65 °C, por lo cual no presentaron diferencia significativa entre dichas condiciones, al igual que entre las temperaturas de 80 y 85 °C. Sin embargo, con la cáscara fresca si presentó diferencia significativa con las cuatro condiciones de secado. Por tanto, la temperatura de secado de la cáscara de tuna no disminuyó la concentración de flavonoides totales, por el contrario, una vez llevado a cabo el proceso de secado en las diferentes muestras, como resultado se tiene la eliminación de la humedad y en consecuencia se pierde el efecto de dilución con agua en los compuestos bioactivos al momento de su determinación.

Figura 7. Concentración de flavonoides totales (expresada en mg ER/g BS) en cáscara de tuna roja fresca y seca. Las literales diferentes indican diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ )

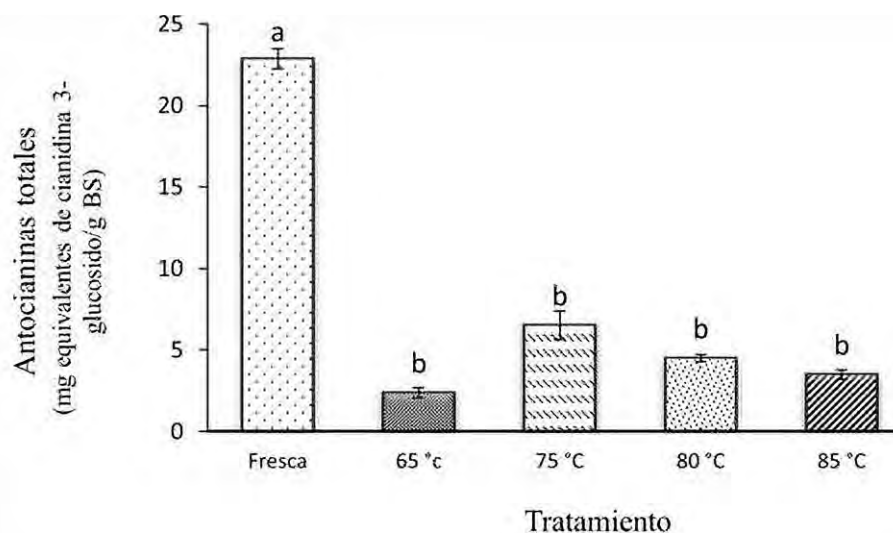


El comportamiento presentado por la cáscara seca de tuna roja fue similar al que presentó el tomate en el estudio realizado por Ching-Hui *et al.* (2006), en donde fue evaluada la concentración flavonoides totales y al igual que en los resultados obtenidos en este estudio, también se presentaron valores elevados en el contenido de flavonoides totales al haber realizado un tratamiento de secado con aire caliente al conseguir resultados de alrededor de 0.05 mg ER/g BS.

En el estudio realizado por Chen *et al.* (2011) reportaron que al determinar la concentración de compuestos bioactivos en cáscara de frutos cítricos tanto fresca como deshidratada obtuvo mayores resultados para cáscara deshidratada cuando esta fue secada con temperaturas altas (80-90 °C) comparada con temperaturas bajas (60 y 70 °C) e incluso comparándolo con la cáscara fresca, esta tendencia difiere con la obtenida en esta investigación, sin embargo, al igual que en el estudio de cáscara de cítricos, también se obtuvo mayor concentración de flavonoides totales al deshidratar este residuo.

Las concentraciones de antocianinas de cáscara de tuna roja fresca y seca pueden ser observadas en la FIGURA 8. Estos resultados muestran una reducción en la concentración de este compuesto debido al tratamiento de secado al cual fue expuesto la cáscara, ya que este pigmento es muy sensible a varios factores entre ellos las altas temperaturas, lo cual produce su deterioro (Kuti, 2004; Badui, 2013). Los resultados de concentración posterior al procesamiento de secado no presentan diferencias significativas entre las diversas muestras, presentando valores hasta 6.33 mg equivalentes de cianidina 3-glucósido/g BS, utilizando 75 °C como temperatura de secado. Mientras que la temperatura de 65 °C presentó la más baja concentración de antocianinas en la cáscara de tuna roja, lo cual puede deberse al tiempo prolongado de exposición (9 h) de la cáscara a la alta temperatura de secado.

Figura 8. Concentración de antocianinas totales (expresada en mg equivalentes de cianidina 3-glucósido/g BS) en cáscara de tuna roja fresca y seca.  
Las literales diferentes indican diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ )





En el trabajo realizado por Nóbrega *et al.* (2013), fueron secados residuos de acerola a dos temperaturas 70 y 80 °C, en sus resultados también se presenta disminución en la concentración de antocianinas del 20 % cuando el secado es a 80 °C comparado con el de 70 °C, mientras que para subproductos de acerola fresca se obtuvieron valores de alrededor de 7.98 mg equivalentes de cianidina 3-glucósido (EC3-glc) /g BS, para los residuos secos los valores de concentración fueron de 2.04-2.90 mg EC3-glc/g BS. Este resultado permite confirmar que la exposición de las antocianinas a altas temperaturas afecta la concentración de estos pigmentos. Mejía-Meza *et al.* (2010) determinaron la concentración de antocianinas antes y después de secado en frambuesa y encontraron que la temperatura de secado tuvo un efecto adverso en la concentración de este compuesto, ya que en muestras frescas se obtuvo aproximadamente 7.3 mg EC3-glc /g BS, mientras que en muestras secadas la concentración de antocianinas disminuyó, presentando valores de 1.3 mg EC3-glc /g BS, aproximadamente.

En la **FIGURA 9** se presentan las concentraciones de betacianinas (betaninas) y betaxantinas (vulgaxantinas-1) en cáscara de tuna fresca y seca. Con respecto a las betacianinas se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo la temperatura de 85 °C en la que se presenta la mayor cantidad de betacianinas (0.71 mg equivalentes de betaninas/g BS), concentración superior al valor determinado en la cáscara fresca. Sin embargo, este comportamiento no fue igual para el resto de las temperaturas evaluadas, ya que en ellas se presenta una disminución del compuesto. Este resultado coincide con la reducción mencionada por Castellar *et al.*, (2003), para jugo de betabel rojo, ya que indica que al someter las betalaínas a temperaturas altas se presenta una degradación térmica la cual puede minimizarse si se considera valores de pH ligeramente ácido, logrando la mayor estabilidad térmica a pH 5.8.

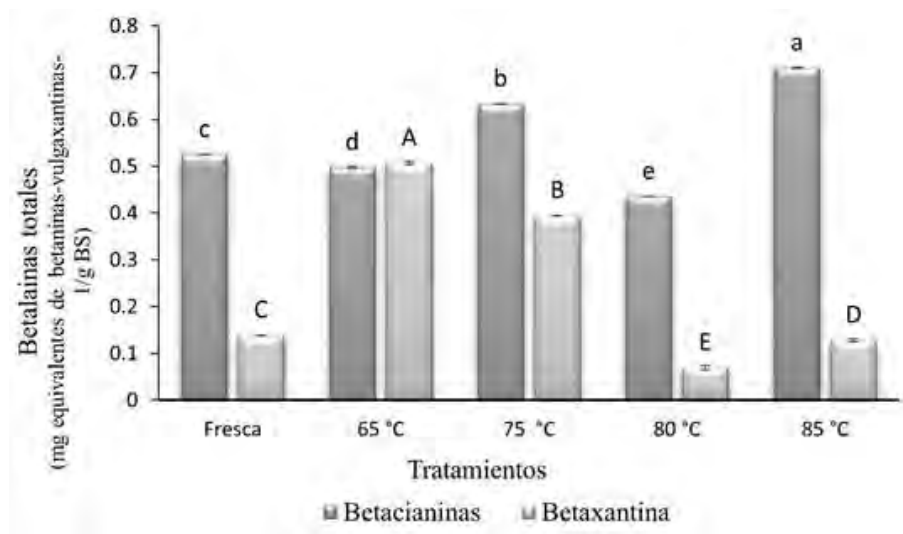
En cuanto a las betaxantinas (vulgaxantina-1), al igual que en las betacianinas, se presentaron diferencias significativas entre las muestras evaluadas ( $p \leq 0.05$ ). La mayor concentración se observó cuando la cáscara de tuna fue secada a 65 °C, con 0.50 mg equivalentes de vulgaxantina-1/g BS, obteniendo valores mayores que los encontrados para la cáscara fresca.

En general, se obtuvieron mayores valores de betacianinas que de betaxantinas, debido a que las betacianinas proporcionan tonalidades entre rojo y púrpura, y por la tonalidad de la cáscara de la variedad de la tuna utilizada, son los biocompuestos con mayor abundancia. Así mismo, se obtuvo un total de 1.0 mg de betalaínas/g BS, cuando la cáscara de tuna fue secada a 65 y 75 °C; y 0.5, 0.8 mg de betalaínas/g BS cuando se secó a 80 y 85 °C, respectivamente. Mientras tanto, la cáscara fresca se obtuvo un total de 0.6 mg de betalaínas/g BS.

En el estudio realizado por Oana-Viorela *et al.* (2017) evaluaron dos temperaturas de secado por un método convectivo a 60 y 70 °C y determinaron las concentraciones de betalaínas (betacianinas y betaxantinas) en betabel, en sus resultados observaron que con la temperatura de 70 °C hay una disminución en la concentración de betacianinas, ya que obtuvieron resultados 0.424 mg equivalentes de betacianinas/g BS; similar al comportamiento en los resultados de este estudio, donde al utilizar la temperatura más elevada se presentaron niveles más altos de concentración, esto puede deberse a que el secado permitió la concentración de estos compuestos por la consecuente eliminación de agua de la matriz vegetal analizada.



Figura 9. Concentración de betalaínas totales (expresada en mg equivalentes de betaninas-vulgaxantinas-1/g BS) en cáscara de tuna roja fresca y seca. Las literales diferentes indican diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ )



### 3. Conclusiones

El secado con aire es un método sencillo y de bajo costo que permite estabilizar residuos de tallos de cebolla y cáscara de tuna roja para obtener de ellos biocompuestos de interés. La mayor deshidratación de tallos de cebolla y cáscara de tuna roja se obtuvieron a 60 y 85 °C, respectivamente. Al ser dos residuos vegetales con un elevado contenido de humedad y estructura física distinta, es importante su remoción de manera correcta a fin de mantener la integridad de los compuestos bioactivos de interés. Por tal razón, la temperatura de secado afecta significativamente la concentración de biocompuestos en las matrices vegetales estudiadas. El secado con aire a 50 °C mantiene mayoritariamente el contenido de flavonoides totales y compuestos fenólicos en tallos de cebolla, mientras que tratamientos a 75 °C y 85 °C mantienen el contenido de flavonoides totales y betacyaninas en cáscara de tuna roja, mientras que al secar con aire a 65 °C se mantiene el contenido de betaxantinas en esta misma matriz. Los tallos de cebolla y cáscara de tuna roja son matrices que se pueden aprovechar como fuentes potenciales de compuestos fenólicos, flavonoides totales, betacyaninas y betaxantinas, de manera que no sean considerados residuos, sino fuentes para potencializar la economía circular de México y otros países productores de los cultivos de cebolla y tuna.

**Agradecimientos:** Al CONACYT por las becas para estudios de Maestría a Jaime-Patlán, M. y Patlán-González, J.S.J.

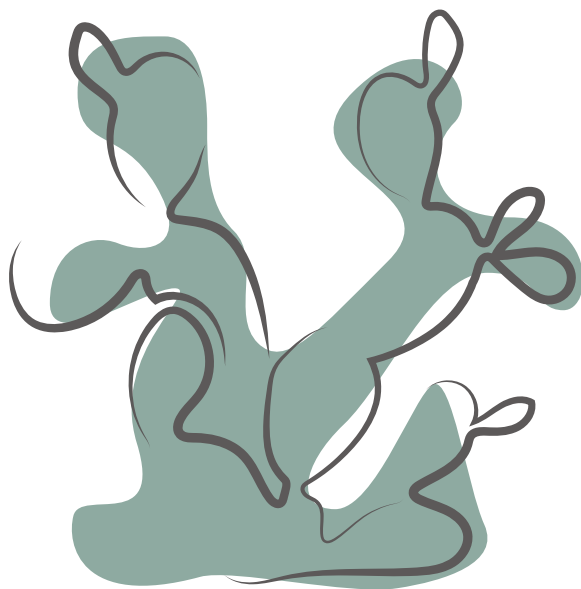
**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

**Conflicto de interés:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

### 3. Referencias

- Aquino-Bolaños, E. N., Chavarría Moctezuma, Y., Chávez Servia, J. L., Guzmán Gerónimo, R. I., Silva Hernández, E. R., y Verdalet Guzmán, I. (2012). Caracterización físico-química de siete variedades de tuna (*Opuntia* spp.) color rojo-violeta y estabilidad del pigmento de las dos variedades con mayor concentración. *Investigación y Ciencia*, 20(55).
- Badui, S. (2013). *Química de los Alimentos*. Editorial Pearson. Quinta edición. México. 396-407.
- Castellar, R., Obón, J. M., Alacid, M. y Fernández-López, J. A. (2003). Color properties and stability of betacyanins from *Opuntia* fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(9), 2772-2776.
- Chandramohan V.P. (2020). Convective drying of food materials: An overview with fundamental aspect, recent developments, and summary. *Heat Transfer*. 49, 1281-1313.
- Chen, M. L., Yang, D. J. y Liu, S. C. (2011). Effects of drying temperature on the flavonoid, phenolic acid and antioxidative capacities of the methanol extract of citrus fruit (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) peels. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(6), 1179-1185.
- Ching-Hui, C.; Hsing-Yu, L.; Chin-Yue, C., y Yung-Chuan, L. (2006). Comparisons on the antioxidant properties of fresh, and hot-air-dried tomatoes. *Journal of Food Engineering* 77, 478-485.
- Demiray, E., Seker, A., y Tulek, Y. (2017). Drying kinetics of onion (*Allium cepa* L.) slices with convective and microwave drying. *Heat Mass Transfer*. 53, 1817-1827.
- Esparza, I., Jiménez-Moreno, N., Bimbela, F., Ancín-Azpilicueta, C., y Gandía, L.M. (2020). Fruit and vegetable waste management: conventional and emerging approaches. *Journal of Environmental Management*, 265, 110510.
- Fernández, M.A., Espino, M., Gomez, F.J.V., y Silva, M.F. (2018). Novel approaches mediated by tailor-made green solvents for the extraction of phenolic compounds from agro-food industrial by-products. *Food Chemistry*. 239, 671-678.
- Khanam, U. K. S., Oba, S., Yanase, E. y Murakami, Y. 2012. Phenolic acids, flavonoids, and total antioxidant capacity of selected leafy vegetables. *Journal of Functional Foods*, 4(4), 979-987.
- Kuti, J. O. (2004). Antioxidant compounds from four *Opuntia cactus* pear fruit varieties. *Food Chemistry*, 85(4), 527-533.
- Liu, X., Yan, X., Bi, J., Wu, X., Liu, J., y Zhou, M. (2019). Identification of phenolic compounds and antioxidant activity of guava dehydrated by different drying methods. *Drying Technology*, 1-14.
- Loredana, L., Giuseppina, A., Filomena, N., Florinda, F., Marisa, D.I. y Donatella, A. (2019). Biochemical, antioxidant properties and antimicrobial activity of different onion varieties in the Mediterranean area. *Journal of Food Measurement and Characterization*.
- Mejía-Meza, E. I., Yanez, J. A., Remsberg, C. M., Takemoto, J. K., Davies, N. M., Rasco, B. y Clary, C. (2010). Effect of dehydration on raspberries: polyphenol and anthocyanin retention, antioxidant capacity, and antiadipogenic activity. *Journal of Food Science*, 75(1).
- Milea, S.A., Aprodu, I., Vasile, A.M., Barbu, V., Răpeanu, G., Bahrim, G.E., y Stănciuc, N. (2019). Widen the functionality of flavonoids from yellow onion skins through extraction and microencapsulation in whey proteins hydrolysates and different polymers. *Journal of Food Engineering*. 251, 29-35.
- Mwithiga, G. y Olwal, J. O. (2005). The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *Journal of Food Engineering*, 71(4), 373-378.
- Nóbrega, E. M., Oliveira, E. L., Genovese, M. I. y Correia, R. T. (2015). The Impact of Hot Air Drying on the Physical-Chemical Characteristics, Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of Acerola (*Malpighia emarginata*) Residue. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(2), 131-141.
- Pal, C.B.T y Jadeja, G.C. (2019). Microwave-assisted deep eutectic solvent extraction of phenolic antioxidants from onion (*Allium cepa* L.) peel: a Box-Behnken design approach for optimization. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 56(9), 4211-4213.
- Ren, F., Perussello, C. A., Zhang, Z., Gaffney, M. T., Kerry, J. P., & Tiwari, B. K. (2017). Effect of agronomic practices and drying techniques on nutritional and quality parameters of onions (*Allium cepa* L.). *Drying Technology*. 36(4), 435-447.
- Reyes-Agüero, J. A. Aguirre-Rivera, J. R. y Hernández, H. M. 2005. Systematic notes and a Detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L) Mill. (CACTACEAE). *Agrociencia*, 39(4).

- Román, M.C., Fabani, M.P., Luna, L.C., Feresin, G.E., Mazza, G., y Rodríguez R.. (2020). *Convective drying of yellow discarded onion (Angaco INTA): modelling of moisture loss kinetics and effect on phenolic compounds*. *Information Processing in Agriculture*, 7 (2), 333-341.
- Sáenz, C. (2006). *Los nopales como recurso natural*. Cadmo Rosell. *Utilización agroindustrial del nopal*. FAO. Roma, Italia. 164p, 1-6.
- Sehrawat, R. y Nema, P. K. (2018). *Low pressure superheated steam drying of onion slices: kinetics and quality comparison with vacuum and hot air drying in an advanced drying unit*. 55(10), 4311–4320.
- Sharma, K., Mahato, N., Nile, S.H., Lee, E.T., & Lee Y.R. (2016). *Economical and environmentally-friendly approaches for usage of onion (Allium cepa L.) waste*. *Food & Function*, 7 (8), 3354-3369
- Slinkard, K. y Singleton, V. L. 1977. *Total phenol analysis: automation and comparison with manual methods*. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28(1), 49-55.
- Stajner, D., y Varga, I. S. (2003). *An evaluation of the antioxidant abilities of Allium species*. *Acta Biologica Szegediensis*, 47(1-4), 103-106.
- Tesoriere, L., Allegra, M., Butera, D. y Livrea, M. A. (2004). *Absorption, excretion, and distribution of dietary antioxidant betalains in LDLs: potential health effects of betalains in humans*. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 80(4), 941-945.
- Vega, A.; Fito, P.; Andrés, A.; Lemus, R. 2007. *Mathematical modelling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo)*. *Journal of Food Engineering*. 79, 1460-1466.
- Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. y Hu, X. (2007). *Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace*. *Food Research International*, 40(1), 39-46.
- Yuasa, M., Kawabeta, K., Morikawa, M., Iwami, M., y Tominaga, M. (2020) *Antioxidant and taste properties of fresh onion (Allium cepa L.) leaves*. *Journal of Food Measurement and Characterization*, doi:10.1007/s11694-020-00704-w
- Ziegler, R. and Egle, K. (1965). *Zur quantitativen analyse der Chloroplastenpigmente*. *Beitr. Biol. Pflanzen* 41: 11-37.



# Potencial aprovechamiento de polímeros naturales usados como prebióticos en la encapsulación de probióticos

Juárez-Trujillo, Naida<sup>1</sup>

Ortiz-Basurto, Rosa Isela<sup>1\*</sup>

Franco-Robles, Elena<sup>3</sup>

Martínez-Gutiérrez<sup>1</sup>, Fidel

Chacón-López, Martina Alejandra<sup>1</sup>

López-García Ulises<sup>1</sup>

Jiménez-Fernández, Maribel<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Lab. Integral de Investigación en Alimento. Tec-NM-Instituto Tecnológico de Tepic. Av. Tecnológico #2595, Col. Lagos del Country, C.P. 63175, Tepic, Nayarit, México.

<sup>2</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana. Av. Dr. Luis Castelazo, Industrial las Ánimas, C.P. 91190 Xalapa, Veracruz, México.

<sup>3</sup> Departamento de Veterinaria y Zootecnia. Universidad de Guanajuato. México.

<sup>4</sup> Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ciencias Químicas.

\*Correspondencia: MJF, "<https://orcid.org/0000-0001-5437-3812>" "<mailto:maribjimenez@uv.mx>" "[maribjimenez@uv.mx](mailto:maribjimenez@uv.mx)"; Tel. 2288418900;

RIOB, "<https://orcid.org/0000-0002-8284-4690>", HYPERLINK "<mailto:riobasurt@ittec.edu.mx>" "[riobasurt@ittec.edu.mx](mailto:riobasurt@ittec.edu.mx)"; Tel 3112241882

Los prebióticos se definen como ingredientes fermentados selectivamente por probióticos y generan cambios específicos en la composición y/o actividad de la microbiota intestinal, lo que confiere beneficios sobre la salud del huésped. Además, se ha demostrado su capacidad protectora cuando son utilizados como material de pared en la encapsulación de probióticos solos o en mezcla, ya que protegen a microorganismos probióticos de factores adversos durante el procesamiento y durante su paso por el tracto gastrointestinal. Los prebióticos se pueden obtener de diferentes fuentes naturales como plantas, subproductos de origen animal y desechos agroindustriales, lo cual permite fortalecer la implementación de la economía circular. Debido a estos beneficios, actualmente, el mercado de los prebióticos se encuentra en crecimiento. Para 2025 se espera que el mercado mundial de prebióticos crezca alrededor del 12.7 % con una ganancia de aproximadamente 10.55 mil millones de dólares. Por lo que, es necesario tener conocimiento preciso y actual sobre el uso, la obtención y beneficios de los prebióticos. Esta revisión presenta la clasificación de los carbohidratos con efecto prebiótico más utilizados, así como su método de obtención. Se realiza un análisis de diferentes fuentes de desecho agroindustrial para la obtención de prebióticos, y su uso en la encapsulación de probióticos como sustrato y/o protección a factores ambientales, procesamiento y/o digestión. Por último, se presentan perspectivas de compuestos con potencial prebiótico.

**Palabras claves:** Carbohidratos, Encapsulación, Prebióticos, Probióticos.



## Introducción

La modulación de la microbiota intestinal se ha convertido en un área destacada para mejorar la salud, debido a que protege contra infecciones y enfermedades, produce importantes vitaminas y energía, lo cual desempeña un papel crucial en las redes reguladoras fisiológicas. En este sentido, los prebióticos y probióticos han demostrado que tienen el potencial de modular infecciones intestinales y mejorar la salud del consumidor al mejorar la población de la microbiota intestinal (Gibson *et al.*, 2017; Azad *et al.*, 2020). Por lo que, el mercado de prebióticos y probióticos se encuentra en crecimiento exponencial y la industria alimentaria, se enfrenta al desafío de satisfa-

cer la creciente demanda de este mercado. Los prebióticos y probióticos se utilizan con la intención de evitar y/o combatir problemas de salud como la enfermedad del hígado graso no alcohólico, el cáncer, la obesidad, la diabetes y las enfermedades cardiovasculares (Tolulope, 2020). En México, estas enfermedades ocasionan miles de muertes cada año. Por lo que, es necesario crear conciencia sobre los efectos benéficos de los prebióticos y probióticos. Los prebióticos son definidos como un sustrato que es utilizado selectivamente por microorganismos hospedadores que confieren beneficio a la salud (Gibson *et al.*, 2017). En complemento, los probióticos son microorganismos vivos que han demostrado que cuando se administran en cantidades adecuadas, fortalecen la flora gastrointestinal (GI) y con ello, confieren diversos beneficios a la salud del anfitrión (Zendebodi *et al.*, 2020). Diferentes estudios han demostrado los efectos benéficos de los probióticos, como la modulación de la microbiota intestinal a través de la inhibición de microorganismos patógenos; la producción de compuestos anticancerígenos y la modulación de las respuestas inmunes, entre otros. Sin embargo, para promover efectos beneficiosos, los microorganismos con propiedades probióticas deben sobrevivir a la exposición a factores ambientales, pudiendo colonizar y mantener la actividad metabólica en el tracto intestinal humano. En este sentido, la encapsulación con prebióticos como material de pared, protege a los microorganismos probióticos a las condiciones ambientales y del tracto GI, asegurando con ello el efecto deseado (Ceja-Medina *et al.*, 2020, 2021, Rodrigues *et al.*, 2020). Actualmente una gran fuente de extracción de prebióticos son los desechos agroindustriales provenientes de las diferentes industrias con el fin de aprovechar estos desechos y obtener un beneficio económico. Sin embargo, en México la utilización de estos desechos aún está en desarrollo ya que no se cuenta con información adecuada sobre los beneficios de aprovechar estos residuos como fuente de prebióticos. Además, de una total ausencia de gestión pública que incentive al desarrollo de esta nueva forma de aprovechamiento. Esta revisión presenta la clasificación de los principales carbohidratos utilizados como prebióticos, así como sus fuentes y métodos de obtención. Se presenta un análisis de diferentes prebióticos utilizados en la encapsulación de probióticos como sustrato y/o material de pared. Por último, se presentan perspectivas de compuestos con potencial prebiótico.



## 1. Características de los prebióticos

Los prebióticos son generalmente carbohidratos no digeribles como oligosacáridos y polisacáridos. Debido a su estructura principal, este tipo de compuestos no es hidrolizado por las enzimas digestivas humanas ni absorbido en el tracto GI superior. Sin embargo, para que pueda ser considerado prebiótico debe cumplir con ciertos requisitos (Ashwini *et al.*, 2019):

1. No debe ser hidrolizado por las enzimas digestivas humanas.
2. Debe fermentarse en el tracto gastrointestinal (GI).
3. Debe estimular selectivamente el crecimiento y/o la actividad de bacterias beneficiosas en el intestino (*Lactobacilli* y *Bifidobacteria*).

Todas estas propiedades de un ingrediente alimentario prebiótico, se deben demostrar tanto en estudios *in vitro* como *in vivo* (Ashwini *et al.*, 2019). Los prebióticos normalmente utilizados en la dieta humana son lactulosa, galactooligosacáridos, fructooligosacáridos, inulina y sus hidrolizados, maltooligosacáridos y almidón resistente. Los prebióticos pasan por el intestino delgado al intestino inferior y se vuelven accesibles para las bacterias probióticas sin ser utilizados por otras bacterias intestinales. Los componentes finales esenciales del metabolismo de los carbohidratos prebióticos son los ácidos grasos de cadena corta, en particular el ácido acético, el ácido propiónico y el ácido butírico, que son utilizados por el organismo huésped como fuente de energía. Estos prebióticos se pueden encontrar naturalmente en diferentes fuentes como achicoria, cebolla, ajo, espárragos, alcachofas, puerros, plátanos, tomates y muchas otras plantas (Miremadi *et al.*, 2016), o ser adicionados como ingredientes en sustitución de grasa y azúcares a diferentes alimentos, para mejorar sus propiedades funcionales, nutricionales, y/o sensoriales como la textura, propiedades reológicas y en adición reducir los altos índices calóricos (Kurek *et al.*, 2018). Entre los alimentos que más se utilizan los probióticos como aditivos son; yogures, bebidas, barras energéticas, galletas, cereales y productos de panadería (Fernández *et al.*, 2016).

### 1. Clasificación de los prebióticos

Los prebióticos han demostrado efectos beneficiosos para la salud humana y animal en el tracto GI (inhibición de patógenos, modulación inmunológica), cardiometabolismo (reducción del colesterol), salud mental (producción de energía y regulación de la cognición) y sistema óseo (mayor absorción de minerales en huesos), entre otros (Cardoso *et al.*, 2020).

Los prebióticos más estudiados, con mayores presentaciones comerciales y uso industrial son los carbohidratos. Entre los que destacan los fructanos (mezcla de polisacáridos principalmente inulinas y fructooligosacáridos (FOS), maltooligosacárido (MO), lactosa, lactulosa y el almidón resistente (Castañeda, 2018; Li *et al.*, 2021). Sin embargo, en el aprovechamiento integral de diferentes residuos, promovidos por las políticas de economía circular, se están promoviendo otros carbohidratos con potencial efecto prebiótico en investigación (FIGURA 1).

Figura 1. Principales carbohidratos de origen vegetal y animal usados y/o propuestos como prebióticos

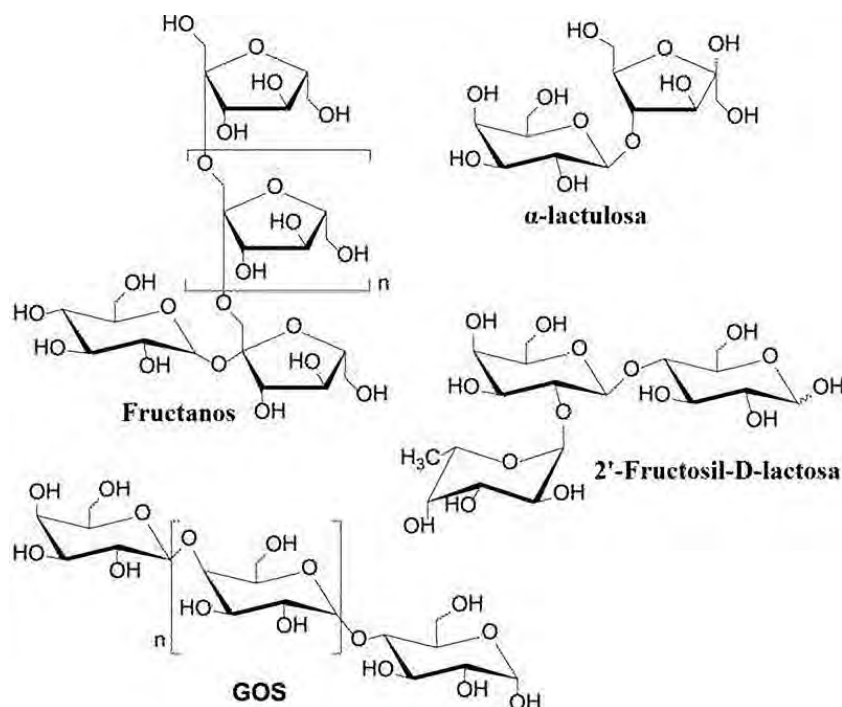


Fructooligosacáridos (FOS), galactooligosacáridos (GOS), xilooligosacáridos (XOS), arabino-xilooligosacáridos (AXOS), Isomaltoligosacáridos (IMO), quitoligosacáridos (QOs), neoagaro-oligosacáridos (NAOs), lactosa y lactulosa (Modificado de Hurtado-Romero *et al.*, 2020).

Con base en el número de monómeros, los prebióticos pueden clasificarse en 3 grupos (Peredo-Lo-villo *et al.*, 2020; Hurtado-Romero *et al.*, 2020):

1. Disacáridos como lactulosa y lactitol.
2. Oligosacáridos (3 a 10 monómeros) tales como fructooligosacáridos, galactooligosacáridos, xilooligosacáridos, isomalto oligosacáridos, oligosacáridos de soja y oligosacáridos pécticos.
3. Polisacáridos (> 10 monómeros) como inulina, almidones resistentes,  $\beta$ -glucanos, pectinas, goma guar, entre otros. Algunos ejemplos de estructuras de estos prebióticos se muestran en la FIGURA 2.

Figura 2. Estructuras químicas de fructanos (FOS, inulina), lactulosa, GOS



Ejemplo de oligosacáridos de la leche materna (2'-fucosil-D-lactosa) (Modificada de Fernández *et al.*, 2016).

Diversos prebióticos han demostrado tener diferentes aplicaciones y efectos benéficos en la salud cuando son consumidos, esta revisión presenta y analiza los prebióticos más utilizados como ingredientes en la industria alimentaria. Los xilooligosacáridos son excelentes oligosacáridos con muchas actividades funcionales, mejoran el crecimiento de bacterias intestinales beneficiosas, promueven la absorción de calcio y la actividad antimicrobiana, reducen los niveles de colesterol y el riesgo de cáncer de colon (Liu *et al.*, 2020).

Los maltooligosacáridos han demostrado beneficios potenciales para la salud humana, pueden mejorar la microbiota intestinal y suprimir la formación de productos putrefactos (Wang *et al.*, 2019). Se pueden utilizar en la industria de alimentos debido a su dulzor suave, osmolalidad relativamente baja, alta capacidad de retención de agua y viscosidad adecuada (Sihui *et al.*, 2017). Se han utilizado para hornear debido a su alta capacidad de retención de agua, que inhibe la cristalización y retrasa el endurecimiento del pan (Wang *et al.*, 2019). Por su parte, los isomalto-oligosacáridos, están demostrando beneficios potenciales para la salud humana, entre ellos; aumento de poblaciones de bacterias intestinales beneficiosas (Lactobacilos y Bifidobacterias), reducción de patógenos, mejora del dismetabolismo glucémico y lipídico y reducción de marcadores oxidativos en ratas diabéticas tipo dos (Young *et al.*, 2019).

La lactulosa es un prebiótico reconocido y resistente a la acción de las enzimas digestivas humanas, llega inalterada al colon donde es fermentada selectivamente por Bifidobacterias y Lactobacilos (Delgado-Fernández *et al.* 2020). Se ha utilizado como nutracéutico y farmacéutico para tratar el estreñimiento crónico, la encefalopatía hepática, la prevención de tumores, y para regular la glucosa en sangre y el nivel de insulina (Aburto *et al.*, 2020). Por su parte, la lactosa es fermentada en el colon para producir ácidos grasos de cadena corta que se utilizan como fuente de energía de colonocitos o como sustratos de bacterias probióticas (Yan y Gänzle, 2017). El lactitol se utiliza como edulcorante no calórico, crioprotector, sustituto de grasa en alimentos como; panes, pasteles, chocolates, carnes congeladas y chicles (Martínez-Monteagudo *et al.*, 2019). Los fructanos proporcionan beneficios tanto energéticos como inmunoprotectores. Debido a que el páncreas y la mucosa del intestino delgado no secretan enzimas capaces de hidrolizar los enlaces  $\beta$ -1,2 fructosilfructosa glicosilo, los fructanos no se hidrolizan entre la boca y el intestino delgado. Una vez que llegan al colon, las bifidobacterias fermentan los fructanos en ácidos grasos de cadena corta (Ackerman *et al.*, 2019). Además, de sus propiedades prebióticas, mejoran del síndrome metabólico e inmunológico (Pintor *et al.* 2020). En la última década, se ha logrado demostrar el efecto prebiótico de los fructanos de agave, los cuales, debido a su fuente de obtención, se consideran un prebiótico novedoso, lo cual ha promovido mayor aplicación en la industria de alimentos. La estructura ramificada de los FA, otorga funciones tecnológicas diferentes a los fructanos lineales tipo inulina, entre ellas mayor capacidad de absorción de agua por lo que se pueden utilizar la producción de helados, yogur, galletas, pan y diversos productos lácteos como sustituto de la grasa o el azúcar. En los últimos años, el uso de fracciones con rangos de peso molecular específico y modificación de los FA, está ampliando las propiedades tecnológicas e interés en aplicación (Ceja-Medina *et al.*, 2020 a y b, 2021, Juárez-Trujillo *et al.*, 2020, Ignat-Gutiérrez *et al.*, 2020; Ramos-Hernández *et al.*, 2020, Aldrete herrera *et al.*, 2019). Los xilooligosacáridos se incorporan a diversos productos alimenticios con diferentes aplicaciones como; edulcorantes, estabilizantes, emulsionantes e ingredientes funcionales. Una de las aplicaciones más importantes de los XOS es en alimentos funcionales, debido a su capacidad para promover efectos beneficiosos para la salud, por su metabolismo selectivo por Bifidobacterias y Lactobacilos, aumentando la producción de ácidos grasos volátiles y anti-úlceras gástricas (Ávila *et al.*, 2020). Otro prebiótico de gran uso es el almidón resistente tipo 3. El almidón resistente se

utiliza ampliamente en la industria alimentaria como espesante, estabilizador coloidal, gelificante y adhesivo (Li *et al.*, 2019). Además, estudios han demostrado que ayuda en enfermedades intestinales, disminuye la respuesta a la insulina y el índice de glucemia e incluso aumenta la cantidad de bacterias beneficiosas y la absorción de minerales, prevención de cáncer colorrectal, efectos hipocolesterolémicos e inhibición de la acumulación de grasa (Jiang *et al.*, 2020; Qin *et al.*, 2020).

## 1.2 Extracción de prebióticos

Los prebióticos se pueden obtener de tres maneras diferentes, de acuerdo al interés de aplicación: 1) Extracción directa de material vegetal. 2) Extracción de polisacáridos y posterior hidrólisis y/o separación (por distintos procedimientos). 3) Combinación de extracción química y biocatálisis para procesos de bioconversión enzimática (Castañeda, 2018). La hidrólisis enzimática es el método más común debido a su reproducibilidad y alto rendimiento (Hurtado-Romero *et al.* 2020). En la FIG. 3 se representan los diagramas de bloques los procesos de extracción de los prebióticos más utilizados.

Figura 3. Procesos de extracción de diferentes prebióticos



(Modificada de Corzo *et al.*, 2015).

Los galactooligosacáridos están presentes en la leche de mamíferos, incluida la humana, contienen entre 2 y 10 restos de galactosa unidos a una glucosa terminal (Botvynko *et al.*, 2019). La estructura química de GOS varía con respecto a longitud de cadena, la ramificación, y enlace glicosilo (Ackerman *et al.*, 2019). Son producidos a partir de la lactosa, usando la actividad galactosiltransferasa de la  $\beta$ -galactosidasa que es la principal enzima en la hidrólisis de lactosa. Los principales productos de la reacción son desde tri- hasta hexasacáridos con dos a cinco unidades de galactosa, también se producen en la reacción disacáridos transgalactosilados formados por una molécula de galactosa y otra de glucosa con un enlace  $\beta$ -glicosídico diferente al de la lactosa (Vera *et al.*, 2020). En este método de obtención uno de los principales problemas es la presencia de monosacáridos que contribuyen a incrementar el índice glucémico, como es el caso de la glucosa. Por lo que, se está implementando el uso de ultrasonido en la extracción para disminuir la presencia de estos monosacáridos (Rico-Rodríguez *et al.*, 2020).

La lactosa es el principal carbohidrato en la leche. Es un disacárido compuesto de glucosa y galactosa que está presente en una concentración de aproximadamente 40 a 50 g/L en la leche de vaca (Gonzaga *et al.*, 2019). La forma más común de extracción de la lactosa consta de dos pasos: el primero es una filtración con membrana del suero de leche y el segundo una cristalización (González-Amado *et al.*, 2021). La lactulosa es un disacárido sintético también llamado 4-O- $\beta$ -D-galactopiranosil-1-D-fructosa, debido a que su molécula se forma por la unión de fructosa y galactosa (Guerrero *et al.*, 2020). Este prebiótico se encuentra naturalmente en muchos alimentos, tales como trigo, cebolla, bananas, miel, ajo y puerro. La lactulosa también se puede aislar de la raíz de achicoria o se puede sintetizar por métodos químicos o enzimáticos (Guarner *et al.*, 2017). Una ruta de obtención de lactulosa es la isomerización alcalina de lactosa, pero tiene como inconveniente el alto costo de la separación y purificación. La segunda ruta es por el uso de reactivos complejos como el borato o el aluminato, pero no es muy utilizado por la complejidad para eliminar estos compuestos de la lactulosa. La alternativa más ecológica, y por lo tanto la más utilizada en los últimos años para la obtención de los GOS es la biocatálisis, donde la enzima  $\beta$ -galactosidasa ( $\beta$ -D-galactohidrolasa) favorece una reacción de transgalactosilación, formando así la lactulosa. La enzima  $\beta$ -galactosidasa ( $\beta$ -D-galactohidrolasa) puede ser producida por *Kluyveromyces lactis*, *Bacillus circulans*, *Lactobacillus acidophilus*, *Aspergillus oryzae* y *Apergillus niger* (Aburto *et al.*, 2020; Guerrero *et al.*, 2020; Vera *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2019).

El lactitol es un alcohol de azúcar o poliol obtenido de la hidrogenación catalítica de lactosa. El lactitol es un poliol monoclinico con un enlace de hidrógeno intra y ocho intermoleculares en su estructura química. Los alcoholes o polioles de azúcar se sintetizan tradicionalmente a partir de jarabe de maíz o biomasa de celulosa a través de un conjunto de reacciones químicas que incluyen oxidación, hidrólisis e hidrogenación. La hidrogenación catalítica se refiere a un conjunto de reacciones químicas en las que se agrega hidrógeno a un grupo funcional reactivo. En el caso de la lactosa, el hidrógeno se agrega al grupo carbonilo de la molécula de glucosa (Martínez-Monteaugudo *et al.*, 2019).

La estructura química de un fructano varía con respecto al enlace glicosídico y el grado de polimerización. En general, la estructura del fructano consiste en una cadena lineal o ramificada de unidades de fructosa con una glucosa terminal y/o intermedia (Ackerman *et al.*, 2019). Los fructanos sintetizados en la naturaleza son solubles en agua y son azúcares no reductores. En la naturaleza se distinguen principalmente cinco clases estructurales de fructanos: inulina, levanos, mezclas de fructanos ramificados, neoserias de inulina y neoserias de levanos. Los fructanos se pueden encontrar en puerro, cebolla, ajo, espárragos, dalia, yacón, agaves, achicoria, y alcachofa de Jerusalén (*Cichorium intybus*), etc. Estas dos últimas son las fuentes más importantes de extracción de inulina, el fructano más usado en la industria de alimentos (Gerschenson *et al.*, 2019). La inulina almacenada en raíz de achicoria (*Chicorium intybus*) y en tubérculos tienen en promedio un grado de polimerización de 10 a 30 (Rivera-Quixchan *et al.*, 2018). Por su parte, los fructanos de *Agave* consisten en una mezcla de isómeros unidos por enlaces  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 1) y/o  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 6), el isómero más abundante es agavina con grados de polimerización aparente máximo de 80, con mayor abundancia en 29 (Aldrete-Herrera *et al.*, 2019).

En complemento, los FOS que son fructanos que se distinguen por su mayor efecto prebiótico y bajo grado de polimerización (3 a 9), se obtienen mediante 2 procesos, que resultan en productos finales ligeramente diferentes. En el primer método, los FOS se producen a partir del disacárido sacarosa usando la actividad transfructosilación de la enzima  $\beta$ -fructofuranosidasa. Los FOS así



formados contienen entre 2 y 4 unidades de fructosa unidas con enlaces  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 1), con un residuo terminal  $\alpha$ -D-glucosa, y entre ellos cabe destacar: 1-kestosa (Glu-Fru2 o GF2), 1-nistosa (Glu-Fru3 o GF3) y 1F-fructosilnistosa (Glu-Fru4 o GF4). Los microorganismos involucrados en este proceso pueden ser *Aspergillus niger*, *A. japonicus*, *A. sydowi*, *A. foetidus*, *A. oryzae*, *A. pullulans*, *Penicillium citrinum*, *Penicillium frequentans*, *Fusarium oxysporium*, *Arthrobacter spp.*, *Zymomonas mobilis*, *Bacillus macerans*, *Kluyveromyces* y *Candida*. El segundo método de obtención de FOS es la hidrólisis enzimática o química de los fructanos. La mezcla de FOS formada por este proceso se parece a la mezcla producida por el proceso de transfructosilación. Sin embargo, no todas las cadenas fructosa con uniones  $\beta$  (2 $\rightarrow$ 1) contienen una glucosa terminal (Frum, m=1-7). A este producto se le conoce como oligofructosa (Wang *et al.*, 2019).

Los xilooligosacáridos (XOS) están compuestos por cadenas de residuos de xilosa, enlazados a través de enlaces xilosídicos  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4), que pueden estar unidos con diferentes grupos laterales (por ejemplo, ácido  $\alpha$ -D-glucopiranosilurónico o su 4-O-metil derivado, grupos acetilo o residuos arabinofuranosilo) formando estructuras ramificadas (Cardoso *et al.*, 2020). Los métodos tradicionales de producción de XOS requieren la presencia de extracción por catálisis básica o ácida. Sin embargo, se pueden utilizar nuevas estrategias, como; tecnologías hidrotérmicas (agua caliente) y catálisis verde. Posterior a la extracción, se requiere la hidrólisis enzimática, mediante la utilización de enzimas como la acetilesterasa o la  $\alpha$ -1-arabinofuranosidasa junto con las enzimas  $\beta$ -1,4-endoxilanasas (Álvarez *et al.*, 2020; Hurtado-Romero *et al.*, 2020). Se han reportado algunas biomásas lignocelulósicas que contienen xilano para la producción de XOS, incluyendo mazorcas de maíz, bagazo de caña de azúcar, eucalipto grandis, madera de abedul, cáscara de avellana, grano usado en cervecería, granos de espinoso y paja de cebada (Álvarez *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020).

Los maltooligosacáridos se definen como oligosacáridos compuestos de tres a diez unidades de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4) glicosídicos. Los maltooligosacáridos son producidos por amilasas formadoras de maltooligosacáridos (Xie *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019). Los maltooligosacáridos pueden producirse por glicosil transferasas y glicosil hidrolasas. Las glicosil hidrolasas ofrecen la ventaja de que pueden utilizar sacáridos económicos y fáciles de obtener, como almidón, como sustratos para la producción de maltooligosacáridos (Sihui *et al.*, 2017). Los isomalto-oligosacáridos (IMO) por su parte son una mezcla de oligosacáridos compuestos por unidades de glucosa unidas a través de  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 2),  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 3),  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4) o enlaces  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 6) glicosídicos, que presentan una amplia gama de GP, de GP2 (isomaltosa, kojibiosa o nigerosa) y GP 3 (panosa, isopanosa o iso- maltotriosa), IMO de cadena larga y ciclo-IMO. La producción industrial de IMO está basada en procesos enzimáticos. El proceso de producción comienza con una licuefacción del almidón usando  $\alpha$ -amilasa y pululanasa seguido de un tratamiento con  $\beta$ -amilasa y  $\alpha$ -glucosidasa. La  $\beta$ -amilasa hidroliza el almidón licuado a maltosa, y luego la  $\alpha$ -glucosidasa produce IMO que contienen residuos de glucosa unidos a  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 6) y  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4) a través de su actividad transglucosidasa (Cardoso *et al.*, 2020). Por último, el almidón resistente (AR) tipo 3 es una fibra dietética prebiótica insoluble que consiste en almidón con alto contenido de amilosa. El almidón resistente se puede extraer por métodos químicos y enzimáticos (desramificación enzimática/ácida) con alto contenido de amilosa (<50 %) de maíz, arroz, frijoles rojos y guisantes amarillos (Arp *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2020).

### 1.3 Extracción de prebióticos a partir de subproductos agroindustriales

Anualmente se generan miles de millones de toneladas de agro-residuos, lo que, alineado con las nuevas políticas de economía circular, los convierte en materias primas rentables para la producción



de compuestos de valor agregado (Hurtado-Romero *et al.*, 2020). Los desechos y/o subproductos agroindustriales, están compuestos principalmente por carbohidratos complejos y proteínas crudas que pueden ser útiles como nutrientes para el crecimiento de microorganismos que permitan la producción de enzimas. Entre los prebióticos más abundantes en desechos agroindustriales se encuentran los FOS, XOS, lactosa y fructanos. La producción de FOS y las enzimas productoras de FOS se pueden extraer a partir de soluciones ricas en sacarosa (melaza de caña de azúcar, melaza de remolacha, jarabes de Agave, soluciones osmóticas gastadas y subproductos de frutos de dátil) cáscaras de frutas (como cáscara de mango, cáscara de plátano, cáscara de piña, cáscara de naranja, etc.), bagazo (como bagazo de caña de azúcar, bagazo de *Agave*, bagazo de maíz, bagazo de coco, bagazo de yuca, etc.), hojas (hoja de plátano, hoja de maíz, hoja de caña de azúcar, etc.), orujos (como orujo de manzana y orujo de uva) y subproductos del procesamiento del café (pulpa de café, cáscara de café y grano gastado de café) (de la Rosa *et al.*, 2019). Por su parte, los XOS se pueden extraer de paja de caña de azúcar, cáscara de café, bagazo de caña de azúcar, elote, paja de trigo, cáscara de piña, cáscara de arroz, cáscara de coco, cáscara de almendra, cáscara de maní, cáscara de avellana, cáscara de castaña, fibra de soja, orujo de aceituna (Ávila *et al.*, 2020; Poletto *et al.*, 2020). La lactosa se extrae principalmente del suero de leche, un subproducto de la industria quesera (González-Amado *et al.*, 2021). Finalmente, los fructanos de alto grado de polimerización son un prebiótico con gran potencial en el mercado por lo que es necesario buscar fuentes de extracción. En México, la principal fuente para la obtención de fructanos, es el Agave. En el Agave, los fructanos se encuentran almacenados en la base del tallo lo que se conoce comúnmente como la piña. El *Agave* posee un alto contenido de carbohidratos (250 g/k) que consisten principalmente en fructanos altamente ramificados y que tienen un alto grado de polimerización (GP). Su cultivo se ha extendido a lo largo del territorio mexicano (Castillo *et al.*, 2019).

#### 1.4 Nuevas tecnologías para la extracción de prebióticos

En complemento al aprovechamiento de estas fuentes alternativas de producción de prebióticos, hoy en día se evalúan procesos novedosos para eficientar la producción de prebióticos mediante tecnologías innovadoras térmicas y no térmicas como: alta presión hidrostática, ultrasonido, microondas y extrusión de forma individual y procesos acoplados (Hurtado-Romero *et al.*, 2020). Se están optimizando procesos que utilizan solventes verdes y/o reducen el consumo de solventes, y al mismo tiempo, facilitan la disrupción celular vegetal y la extracción de compuestos (Coelho *et al.*, 2020). El ultrasonido genera cavitación, produciendo efectos físicos, como corrientes de circulación de líquidos y turbulencias, ayudando a la ruptura de la pared celular de la materia prima, lo cual permite un aumento significativo de la permeabilidad de los tejidos vegetales y mayor rendimiento (Hurtado-Romero *et al.*, 2020). La extracción asistida por microondas utiliza ondas electromagnéticas, que pueden aumentar de manera homogénea la temperatura del sistema de extracción, mejorando la liberación de moléculas objetivo con el uso de volúmenes bajos de solvente y un tiempo de procesamiento reducido (Santana y Macedo, 2019). El procesamiento de alta presión (HPP), implica la aplicación de presiones muy altas (100-1000 MPa) durante un tiempo corto (hasta 20 min) utilizando agua como medio de transmisión de presión (Lima *et al.*, 2020). La tecnología HHP se ha utilizado ampliamente durante las últimas décadas en la industria alimentaria como herramienta de procesamiento, principalmente porque ofrece muchas ventajas en comparación con las tecnologías tradicionales de procesamiento de alimentos. Estos incluyen la preservación de las propiedades sensoriales, la inactivación de enzimas y microorganismos, cambios en la funcionalidad del producto e incluso la modificación de polímeros (Hurtado-Romero, 2020). La extrusión

combina cizallamiento mecánico y temperatura para romper estructuras de la pared celular y así poder realizar la extracción. Se ha observado una mejora en la extracción de polisacáridos de trigo (Yan *et al.* 2020). Otra tecnología recientemente estudiada es la extracción con sistemas acuosos de dos fases (SADF). Los SADF basan en la inmiscibilidad entre soluciones acuosas de dos (o más) componentes diferentes bajo ciertas condiciones de concentración y temperatura. Cuando se alcanza el equilibrio, los sistemas forman dos fases líquidas inmiscibles, y cada fase está enriquecida en uno de estos componentes formadores de fase. Por lo general, se utilizan dos polímeros o un polímero y una sal como componentes formadores de fase. Este tipo de extracción se ha utilizado para lactosa, como paso previo a la filtración con membrana de subproductos de la industria láctea como el suero de leche. Estudios han demostrado que mejorará el proceso de separación, reduce la suciedad, prolonga la vida de la membrana y permite la reducción del proceso de la membrana (González-Amado *et al.*, 2021). Estos métodos de extracción han demostrado tener una mejor eficiencia de extracción sin perjudicar el efecto prebiótico de los compuestos extraídos, además de una mejor estabilidad y mejores propiedades funcionales (Hurtado-Romero *et al.* 2020). Finalmente, el acoplamiento de procesos como la extracción por microondas asistida por ultrasonido es una nueva tecnología de proceso que combina los métodos de ultrasonido y microondas. Esta tecnología aprovecha al máximo el efecto de alta energía de las microondas y cavitación ultrasónica. La extracción rápida y eficiente con este método se puede realizar a baja temperatura bajo condiciones ambientales, ahorrando energía y tiempo. Esta tecnología ha demostrado altos rendimientos de extracción de oligosacáridos (Guo *et al.*, 2019).

### 1.5 Encapsulación de probióticos con prebióticos

En los últimos años, los diferentes tipos de formulaciones prebióticas han atraído una mayor atención. Entre ellos, hoy en día el más favorable y predominantemente practicado es la encapsulación de estos prebióticos y probióticos en emulsiones o sistemas basados en nano y microcápsulas (Shah *et al.*, 2020). La encapsulación en general se refiere a un proceso que atrapa un material en otro material y produce partículas en diferentes escalas. La parte encapsulada se conoce como material del núcleo, fase interna, agente activo o fase de carga útil. El material que se utiliza como material de pared para encapsular el núcleo, se denomina membrana de revestimiento, portador, capa, fase externa o matriz (Asgari *et al.*, 2020). La encapsulación es una técnica con el fin de proteger el principio activo de las condiciones ambientales que pueden degradar o dañar al compuesto de interés y/o microorganismo probiótico (por ejemplo, luz, oxígeno, pH, calor, etc.) así como para controlar su liberación (Shah *et al.*, 2020). Entre las técnicas más utilizadas se utilizan la atomización electrodinámica o electropulverización, coacervación compleja, gelificación interna, emulsificación y secado por aspersión. En el secado por aspersión, una solución acuosa u oleosa con los probióticos y el prebiótico portador disuelto, pasa a través de un atomizador o boquilla de aspersión para formar una niebla y dispersar la suspensión en forma controlada. En seguida, las gotas ingresan a una cámara en donde se insufla un flujo de gas caliente (aire o nitrógeno) para evaporar el solvente. Finalmente, las partículas encapsuladas se transportan a un separador ciclónico para su recuperación (Asgari *et al.*, 2020). En la pulverización electrodinámica, una solución polimérica que contiene materiales activos se extruye a través de una boquilla capilar y se atomiza en gotitas ultrafinas mediante fuerzas eléctricas. La electropulverización tiene varias ventajas: ofrece una configuración experimental simple y flexible que es capaz de producir microcápsulas con cargas mono-dispersas a partir de soluciones poliméricas viscosas, no implica temperaturas extremas ni disolventes orgánicos (Zaeim *et al.*, 2019). La extrusión es un buen método para formar perlas uniformes con mayor rendimiento.

La unión intermolecular de los materiales de encapsulación ayuda a formar una estructura de matriz estable (Azam *et al.*, 2020). La coacervación compleja es un proceso que se basa en la interacción entre dos biopolímeros con cargas eléctricas opuestas a un pH dado, lo que conduce a una separación de fases en el sistema y, por lo tanto, a la formación de complejos coacervados, este es uno de los métodos de encapsulación más utilizados actualmente (de Almeida *et al.*, 2019). La combinación de polímeros y prebióticos es favorable para mantener la viabilidad del probiótico ayudando a abordar las limitaciones de cada uno. La proporción correcta de estos materiales, permite lograr los atributos estructurales y funcionales deseados (Azam *et al.*, 2020). Además, diversos estudios han mostrado efectos benéficos cuando se administran prebióticos y probióticos para la obtención de simbióticos funcionales. Tajabadi-Ebrahimi *et al.*, (2017) administraron *L. acidophilus*, *L. casei*, *B. bifidum* e inulina y reportaron una disminución significativa de la glucosa plasmática y concentraciones séricas de insulina. Song *et al.* (2020) administraron *B. breve* CBT BR3, *L. plantarum* CBT LP3 y fructooligosacárido encontrando una mejora en marcadores relacionados con la obesidad en personas obesas. Por su parte, Javadi *et al.*, (2017) administraron *B. longum* y *L. acidophilus* e inulina de alto rendimiento, ellos observaron una mejora en hígado graso. En la TABLA 1. Se muestran los trabajos más recientes de encapsulación de probióticos con prebióticos

Tabla 1. Trabajos recientes de encapsulación de probióticos en combinación con prebióticos.

| Prebiótico                               | Probiótico                                                         | Método de encapsulación                  | Principales resultados                                                                                         | Referencia                            |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Inulina, almidón resistente              | <i>L. plantarum</i> ,<br><i>B. lactis</i>                          | Atomización electrodinámica              | Mantenimiento de la viabilidad del probiótico en el almacenamiento y tracto gastrointestinal <i>in vitro</i> . | Zoeim <i>et al.</i> , (2019).         |
| Inulina Plantago psyllium                | <i>L. plantarum</i>                                                | Coacervación compleja                    | Mantenimiento de la viabilidad del probiótico en el almacenamiento y tracto gastrointestinal <i>in vitro</i> . | Peredo <i>et al.</i> , (2016).        |
| Inulina                                  | <i>L. acidophilus</i> LA-5                                         | Emulsificación /gelificación interna     | Mantenimiento de la viabilidad del probiótico en el almacenamiento y tracto gastrointestinal <i>in vitro</i> . | Carine <i>et al.</i> , (2020).        |
| Fructooligosacáridos                     | <i>L. rhamnosus</i>                                                | Extrusión                                | Mejora la estabilidad en el almacenamiento. Protección del probiótico <i>in vitro</i> .                        | Azam <i>et al.</i> , (2020).          |
| Inulina                                  | <i>L. acidophilus</i> TISTR 1338                                   | Extrusión                                | Protección del probiótico en altas temperaturas.                                                               | Jantarathin <i>et al.</i> , (2017).   |
| Inulina Almidón resistente               | <i>L. acidophilus</i>                                              | Gelificación iónica externa              | Mejora la estabilidad en el almacenamiento. Protección del probiótico <i>in vitro</i> .                        | Poletto <i>et al.</i> , (2019).       |
| Arabinoxilanos                           | <i>L. plantarum</i>                                                | Cogelificación                           | Estabilidad gástrica, resistencia a las sales biliares y estabilidad de almacenamiento.                        | Wu y Zhang., (2018).                  |
| Inulina Orujo de manzana Cáscara de tuna | <i>L. plantarum</i> ,<br><i>E. faecium</i> ,<br><i>A. viridans</i> | Emulsificación, gelificación ionotrópica | Protección en condiciones gastrointestinales <i>in vitro</i> .                                                 | Serrano-Casas <i>et al.</i> , (2019). |
| FOS Inulina                              | <i>L. lactis</i> ABRI-INW-N19                                      | Extrusión                                | Estabilidad durante el almacenamiento. Protección en condiciones gastrointestinales <i>in vitro</i> .          | Nami <i>et al.</i> , (2020).          |

|                                                    |                          |                                        |                                                                                               |                                          |
|----------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Inulina Almidón resistente                         | <i>L. plantarum</i>      | Electropulverización                   | Mejora de la supervivencia en el almacenamiento y producción de helado.                       | Zacim <i>et al.</i> , (2020).            |
| Inulina                                            | <i>L. casei</i>          | Coacervación compleja                  | Mejora de la supervivencia en condiciones gastrointestinales <i>in vitro</i> .                | Darjani <i>et al.</i> , (2016).          |
| Almidón resistente                                 | <i>L. rahmnosus GG</i>   | Coacervación                           | No se encontró mejora.                                                                        | Sin <i>et al.</i> , (2016).              |
| Fructanos de agave de alto grado de polimerización | <i>B. animalis</i>       | Emulsificación / Coacervación compleja | Protección del probiótico durante el secado, almacenamiento y condiciones gastrointestinales. | Juárez-Trujillo <i>et al.</i> , (2020).  |
| Fructanos nativos de agave                         | <i>E. faecium</i>        | Secado por aspersión                   | Protección del probiótico durante el secado, almacenamiento y condiciones gastrointestinales. | Cansino-Castillo <i>et al.</i> , (2020). |
| Inulina                                            | <i>L. plantarum TC24</i> | Coacervación compleja                  | Supervivencia del probiótico en condiciones gastrointestinales.                               | Nakkarach y Withayagiat, (2018).         |
| Inulina                                            | <i>B. animalis</i>       | Electrohilado                          | Protección del probiótico.                                                                    | Javad <i>et al.</i> , (2020).            |

## 1.6 Tendencias y perspectivas

En la proyección del mercado mundial de prebióticos para el 2025, se espera crezca alrededor del 12.7 %, con ganancia de aproximadamente 10.55 mil millones (Mano *et al.*, 2018), por lo que los esfuerzos de investigación más importantes se centran actualmente en la búsqueda de materias primas que alineadas con las nuevas políticas de economía circular, permitan la producción o síntesis de ingredientes con potencial prebiótico (Hurtado-Romero *et al.*, 2020). Entre los carbohidratos con potencial prebiótico se encuentran la polidextrosa, péptico-oligosacáridos, glucooligosacáridos, maltooligosacáridos, oligosacáridos de soja, gentio-oligosacáridos, lactosacarosa, ciclodextrinas y xopolisacáridos (oligosacáridos) (Wang *et al.*, 2020). En esta búsqueda también se han propuesto como prebióticos algunos compuestos no carbohidratos: fitoquímicos como polifenoles (ácidos fenólicos, flavonoides y lignanos), proteínas, ácidos orgánicos, metabolitos de bacterias, minerales y ácidos grasos poliinsaturados (Neri-Numa y Pastore., 2020; Hurtado-Romero *et al.*, 2020). De los cuales los que más han destacado son los polifenoles, ácidos grasos poliinsaturados y exopolisacáridos que se describen a continuación. Los polifenoles son compuestos bioactivos que se pueden encontrar en té, frutas, verduras, raíces, semillas, cacao y vino. Los polifenoles se componen de uno o más anillos aromáticos que llevan al menos un sustituyente hidroxilo y pueden poseer otros grupos funcionales como ésteres, glucósidos y éteres metílicos (Mojzer *et al.*, 2016; Moorthy *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2020). Diversos ensayos clínicos han mostrado una mayor abundancia de *Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium* y *Faecalibacterium spp.* y un aumento en la producción de ácidos grasos de cadena corta cuando se consumen componentes bioactivos como: catequinas, antocianinas y proantocianidinas (Medeiros *et al.*, 2020). Los ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) están compuestos por un ácido carboxílico y una cola alifática que contiene más de un doble enlace carbono-carbono. Los PUFA son las familias omega-3 y 6 derivadas del  $\alpha$ -linolénico ácido y ácido linoleico, respectivamente. Dado que los humanos no son capaces de sintetizarlos, los PUFA omega-3 y 6 se obtienen de varias plantas y alimentos de origen animal como carne, pescado, aceites o semillas vegetales y de pescado. Se ha demostrado que el consumo de ácidos grasos poliinsaturados omega-3 mejora enfermedades inflamatorias, disminuye la concentración de algunos patógenos y genera un aumento de bacterias productoras de ácidos grasos de cadena corta (Cardoso *et al.*,

2020). Recientemente, se demostró que proteínas, hidrolizados de proteínas y los péptidos también se pueden utilizar para promover el crecimiento selectivo de la microbiota intestinal. Por lo que se han estudiado diferentes fuentes de proteínas: suero de queso, leche materna, caseína, soja o péptidos resultantes de la hidrólisis de huesos y plumas de aves de corral. La acción de los compuestos proteicos sobre el crecimiento de los probióticos se ha relacionado con su alto contenido de nitrógeno (Cardoso *et al.*, 2020). Los exopolisacáridos (EPS) son polisacáridos de cadena larga que son excretados principalmente por bacterias y microalgas en su entorno durante el crecimiento. Estudios han demostrado que son fuente de carbono para el crecimiento de bacterias benéficas, además tienen actividades antitumorales, antiulcerosas, inmunomoduladoras y reductoras del colesterol. En la industria de alimentos se utilizan como estabilizantes, emulsionantes o gelificantes (Alhusseiny *et al.*, 2020). Todos estos son candidatos a prebióticos que aún están en estudio para su validación.

## 2. Conclusiones

Ante la búsqueda del fortalecimiento de la implementación de la economía circular, esta revisión presenta una perspectiva general de la extracción, uso y aplicaciones de prebióticos. En esta revisión se muestra que existe un número muy limitado de prebióticos bien establecidos y estudiados, por lo que aún falta mucha investigación para el establecimiento y aprobación de los prebióticos en desarrollo y los posibles candidatos. Además, se puede concluir que los subproductos agroalimentarios tienen un gran potencial para la obtención de los prebióticos ya establecidos. Sin embargo, es necesario llegar a una mejor estandarización de las técnicas de extracción para obtener los mejores resultados en la extracción y escalamiento a nivel industrial, aunque la materia prima sea diversa. Asimismo, es necesario crear mayor difusión de todas estas áreas de investigación en la comunidad industrial ya que muchas veces ellos no cuentan con el conocimiento necesario para poder aprovechar los desechos agroindustriales que producen. Es necesario realizar una mayor investigación para la implementación de las tecnologías emergentes que si bien son muy eficientes para la extracción de prebióticos de calidad muchas veces su implementación en la industria es costosa. A su vez, la implementación de la combinación de prebióticos y probióticos mejora la estabilidad del probiótico bajo diferentes condiciones. Sin embargo, estos estudios se centran en los prebióticos más comercializados por lo que es necesaria una mayor investigación de los prebióticos poco comercializados.

**Agradecimientos:** Este capítulo es parte de los productos de colaboración de miembros (MJF, RIOB, EFR, FMG) de la Red Nacional de Agaves AGARED.

**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo

**Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



### 3. Referencias

- Aburto, C., Guerrero, C., Vera, C., Illanes, A. (2020). Improvement in the yield and selectivity of lactulose synthesis with *Bacillus circulans*  $\beta$ -galactosidase. *LWT - Food Science and Technology* 118, 108746. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108746>.
- Ackerman, D.L., Craft, C.K., Townsend, S.D. (2017). Infant food applications of complex carbohydrates: Structure, synthesis, and function. *Carbohydrate Research*. 437, 16-27, <https://doi.org/10.1016/j.carres.2016.11.007>.
- Aldrete-Herrera, P.I.; López, M.G.; Medina-Torres, L.; Ragazzo-Sánchez, J.A.; Calderón-Santoyo, M.; González-Ávila, M.; Ortiz-Basurto, R.I. (2019). Physico-chemical Composition and Apparent Degree of Polymerization of Fructans in Five Wild Agave Varieties: Potential Industrial Use. *Foods*, 8, 404.
- Álvarez, C., González, A., Alonso, J.L., Sáez, F., Negro, M.J., Gullón, B. (2020). Xylooligosaccharides from steam-exploded barley straw: Structural features and assessment of bifidogenic properties. *Food and Bioproducts Processing* 124, 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.08.014>.
- Arp, C.G., Jimena, C.M., Ferrero, C. (2020). Kinetic study of staling in breads with high-amylose resistant starch. *Food Hydrocolloids*, 106, 105879, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105879>.
- Asgari, S., Pourjavadi, A., Rask, L.T., Boisen, A., Ajallouei, F. (2020). Polymeric carriers for enhanced delivery of probiotics. *Advanced Drug Delivery Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2020.07.014>.
- Ávila, F.Á. (2013). Prebióticos: Alternativas mexicanas *Horizonte Sanitario*, vol. 12, núm. 1, enero-abril, pp. 4-6 Universidad Juárez Autónoma de Tabasco Villahermosa, México <https://www.redalyc.org/pdf/4578/457845143004.pdf>
- Ávila, P.F., Martins, M., de Almeida C.F.A., Goldbeck, R. (2020). Xylooligosaccharides production by commercial enzyme mixture from agricultural wastes and their prebiotic and antioxidant potential. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fiber* 24, 100234, <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2020.100234>.
- Azad, M.A.K., Gao, J., Ma, J., Li, T., Tan, B., Huang, X., Yin, J. (2020). Opportunities of prebiotics for the intestinal health of monogastric animals. *Animal Nutrition*. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2020.08.001>
- Azam, M., Saeed, M., Pasha, I., Shahid, M. (2020). A prebiotic-based biopolymeric encapsulation system for improved survival of *Lactobacillus rhamnosus*. *Food Bioscience*, 37, 100679. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100679>.
- Ashwini, A., Ramya, H.N., Ramkumar, C., Kakarla, R.R., Raghavendra, V.K., Abinaya, V., Naveen, S., Anjanapura, V.R. (2019). Reactive mechanism and the applications of bioactive prebiotics for human health: Review. *Journal of Microbiological Methods* 159, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2019.02.019>.
- Borges, M.T., Higashi, B., Sanches, L.S.M., Pedroza C.J.W., Ribeiro, de A.R.T., Jorge, P.E., Gonçalves, J.E., Correia, G.R.A., Braz, de O.A.J. (2020). Prebiotic fructooligosaccharides obtained from escarole (*Cichorium endivia* L.) roots. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fiber* 24, 100233. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2020.100233>.
- Botvynko, A., Bednářová, A., Henke, S., Shakhno, N., Čurda, L., (2019). Production of galactooligosaccharides using various combinations of the commercial  $\beta$ -galactosidases, *Biochemical and Biophysical Research Communications* 517 (4), 762-766, <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2019.08.001>
- Cancino-Castillo, L.A., Beristain, C.I., Pascual-Pineda, L.A., Ortiz-Basurto, R.I., Juárez-Trujillo, N., Jiménez-Fernández, M. (2020). Effective microencapsulation of *Enterococcus faecium* in biopolymeric matrices using spray drying. *Applied Microbiology and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10943-y>
- Cardoso, B.B., Amorim, C., Silvério, S.C., Rodrigues, L.R. (2020). Novel and emerging prebiotics: Advances and opportunities. *Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press, ISSN 1043-4526. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2020.08.001>.
- Carine, R.G., Poletto, G., de Deus, C., Franco, C.C., Cichoski, A.J., Jacob-Lopes, E., Edson Irineu, M.E., Moraes, F.E.M., Almeida, E.E., Ragagnin, de M.C. (2020). Use of prebiotic sources to increase probiotic viability in pectin microparticles obtained by emulsification/internal gelation followed by freeze-drying. *Food Research International*, 130, 108902. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108902>
- Castillo, A.A.I., Rivera, B.C., Ruiz, C.M.A., Soria, G.R.E., García, C.E., Fuentes, A.C., Grajales, L.A. (2019). *Agave salmiana* fructans as gut health promoters:



- Prebiotic activity and inflammatory response in Wistar healthy rats. *International Journal of Biological Macromolecules* 136, 785-795. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.045>.
- Castañeda, G.C. (2018). Update in prebiotics. *Revista Cubana Pediatría* 90(4). Disponible en: <[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S003475312018000400008&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S003475312018000400008&lng=es&nrm=iso)>. ISSN 0034-7531.
- Ceja-Medina, L.I., Ortiz-Basurto, R.I., Medina-Torres, L., Calderas, F., Bernad-Bernad, M.J., González-Laredo, R.F., Ragazzo-Sánchez, J.A., Calderón-Santoyo, M., González-Ávila, M., Andrade-González, I., Manero, O. (2020). Microencapsulation of *Lactobacillus plantarum* by spray drying with mixtures of Aloe vera mucilage (*Aloe barbadensis* Miller) and Agave fructans high DP as wall materials. *Journal of Food Process Engineering*.
- Ceja-Medina, L.I., Jiménez-Fernández, M., Andrade-González, I., Chacón-López, M.A., García-Magaña, M.L., Bonilla-Cárdenas, J.A., Navarrete-Guzmán, A., Ortiz-Basurto, R.I. (2020) Microbiological stability and general sensory acceptance of microfiltered skim milk with Agave fructans of a high degree of polymerization added. *Journal of Food Safety* 40(3) ID 16823516, DOI: 10.1111/jfs.12844
- Ceja-Medina, L.I., Ortiz-Basurto, R.I., González-Ávila, M., Martínez-Rodríguez, J.C., Andrade-González, I., Calderón Santoyo, M., Ragazzo-Sánchez, J.A., Medina-Torres, L. (2021). In vitro synbiotic activity of *Lactobacillus plantarum* encapsulated with mixtures of Aloe vera mucilage, agave fructans and food additives as wall materials. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 20, No. 2 711-723. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio2234>
- Coelho, M.C., Pereira, R.N., Rodrigues, A.S., Teixeira, J.A., Pintado, M.E. (2020). The use of emergent technologies to extract added value compounds from grape by-products. *Trends in Food Science & Technology* 106, 182-197. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.028>.
- Corzo, N., Alonso, J.L., Azpiroz, F., Calvo, M. A., Cirici, M., Leis, R., Lombó, F., Mateos-Aparicio, I., Plou, F. J., Ruas-Madiedo, P., Rúperez, P., Redondo-Cuenca, A., Sanz, M. L. y Clemente, A. (2015). Prebióticos; concepto, propiedades y efectos beneficiosos. *Nutrición Hospitalaria*. 31(1):99-118. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3092/309238517015>
- Darjani, P., Hosseini, N. M., Kadkhodae, R., Milani, E. (2016). Influence of prebiotic and coating materials on morphology and survival of a probiotic strain of *Lactobacillus casei* exposed to simulated gastrointestinal conditions. *LWT - Food Science and Technology*, 73, 162-167, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.05.032>.
- Delgado-Fernández, P., Hernández-Hernández, O., Olano, A., Javier, M.F., Corzo, N. (2020). Probiotic viability in yoghurts containing oligosaccharides derived from lactulose (OsLu) during fermentation and cold storage. *International Dairy Journal*, 102, 104621. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104621>.
- De Almeida, P.D., Furtado, M.E.M., de Almeida, C.N., Martins, de O.P., Basilio, de O.E., Mota, R.A. (2019). Use of gelatin and gum arabic for microencapsulation of probiotic cells from *Lactobacillus plantarum* by a dual process combining double emulsification followed by complex coacervation. *International Journal of Biological Macromolecules* 133, 722-731. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.110>.
- De la Rosa, O., Flores-Gallegos, A.C., Muñiz-Marquez, D., Nobre, C., Contreras-Esquivel, J.C., Aguilar, C.N. (2019). Fructooligosaccharides production from agro-wastes as alternative low-cost source, *Trends in Food Science & Technology* 91, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.06.013>.
- Fernández, J., Redondo-Blanco, S., Gutiérrez-del-Río, I., Miguélez, E.M., Villar, C.J., Lombó, F. (2016). Colon microbiota fermentation of dietary prebiotics towards short-chain fatty acids and their roles as anti-inflammatory and antitumour agents: A review. *Journal of Functional Foods* 25, 511-522, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.06.032>.
- Gerschenson, L.N., Rojas, A.M., Fissore, E.N. (2019). Chapter 7 - Conventional and Emerging Extraction Technologies, Editor(s): Charis M. Galanakis. *Dietary Fiber: Properties, Recovery, and Applications*, 199-245, ISBN 9780128164952, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816495-2.00007-1>.
- Gibson, G.R., Hutkins, R., Sanders, M.E., Prescott, S.L., Reimer, R.A., Salminen, S.J., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K.S., Cani, P.D., Verbeke, K., Reid, G. (2017). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Natural Reviews Gastroenterology Hepatology* 14, 491-502.

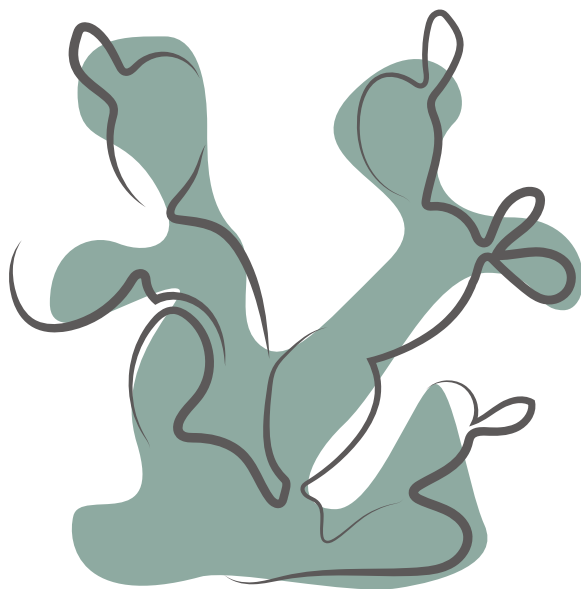
- Gonzaga, N., Shinji, W.L., Mareze, J., Bervelier, M.T., Tamani, R., Rios, E.A., Nixdorf, S.L., Beloti, V. (2019). Green method using water for lactose and lactulose extraction and determination in milk by high-performance liquid chromatography with refractive index detection, *LWT - Food Science and Technology*, 113, 108288. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108288>.
- González-Amado, M., Tavares, P.M.A., Freire, M., Soto, A., Rodríguez, O. (2021). Recovery of lactose and proteins from cheese whey with poly(ethylene)glycol/sulfate aqueous two-phase systems. *Separation and Purification Technology*, 255, 117686. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117686>.
- Guerrero, C., Suárez, S., Aburto, C., Ubilla, C., Ramírez, N., Vera, C., Illanes, A. (2020). Comparison of batch and repeated batch operation of lactulose synthesis with cross-linked aggregates of *Bacillus circulans*  $\beta$ -galactosidase. *Process Biochemistry* 94, 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.04.025>.
- Guarner, F., Ellen, S.M., Eliakim, R., Fedorak, R., Gangl, A., Garisch, J., Kaufmann, P., Karakan, T., Khan, G.A., Kim, N., De Paula, J.A., Ramakrishna, B., Shanahan, F., Szajewska, H., Thomson, A., Le Mair, A. (2017). World Gastroenterology Organisation, 2017. Guía mundial de la WGO Probióticos y prebióticos. <https://www.endoscopiadrolivera.com/wp-content/uploads/2020/03/probiotics-and-prebiotics-spanish-2017.pdf>
- Guo, Z., Zhao, B., Li, H., Miao, S., Zheng, B. (2019). Optimization of ultrasound-microwave synergistic extraction of prebiotic oligosaccharides from sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.009>.
- Hurtado-Romero, A., Del Toro-Barbosa, M., García-Amezquita, L.E., García-Cayuela, T. (2020). Innovative technologies for the production of food ingredients with prebiotic potential: Modifications, applications, and validation methods. *Trends in Food Science & Technology* 104, 117-131. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.007>.
- Ignot-Gutiérrez, A., Ortiz-Basurto, R.I., García-Barradas, O., Díaz-Ramos, D.I., Jiménez-Fernández, M. (2020). Physicochemical and functional properties of native and modified Agave fructans by acylation. *Carbohydrate Polymers*, 245, 116529. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116529>.
- Iramaia, A., Neri-Numa G., Pastore, M., (2020). Novel insights into prebiotic properties on human health: A review. *Food Research International* 131, 108973. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108973>
- Jantarathin, S., Borompichaichartkul, C., Sanguandee, R. (2017). Microencapsulation of probiotic and prebiotic in alginate-chitosan capsules and its effect on viability under heat process in shrimp feeding. *Materials Today: Proceedings* 4(5)2, 6166-6172. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.111>.
- Javad, M.S., Fakhreddin, H.S., Gharsallaoui, A. (2020). Viability improvement of *Bifidobacterium animalis* Bb12 by encapsulation in chitosan/poly (vinyl alcohol) hybrid electrospun fiber mats. *Carbohydrate Polymers* 241, 116278. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116278>.
- Javadi, L., Mostafa, G., Manouchehr, K., Abdolrasoul, S., Abolfazl, B., Gargari, B.P. (2017). El efecto de los probióticos y/o prebióticos en las pruebas de función hepática en pacientes con enfermedad del hígado graso no alcohólico: un ensayo clínico aleatorizado doble ciego. *Revista Médica de la Media Luna Roja de Irán* 19(4).
- Jiang, F., Du, C., Jiang, W., Wang, L., Du, S. (2020). The preparation, formation, fermentability, and applications of resistant starch. *International Journal of Biological Macromolecules* 150, 1155-1161. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.124>.
- Joshua, A.J. (2020). Immune boosting functional foods and their mechanisms: A critical evaluation of probiotics and prebiotics. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 130, 110625. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110625>
- Juárez-Trujillo, N., Jiménez-Fernández, M., Franco-Robles, E., Beristain-Guevara, C.I., Chacón-López, M.A., Ortiz-Basurto, R.I. (2020). Effect of three-stage encapsulation on survival of emulsified *Bifidobacterium animalis* subsp. *Lactis* during processing, storage and simulated gastrointestinal tests. *LWT*, 110468. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110468>
- Kurek, M.A., Wyrwicz, J., Brzeska, M., Moczowska, M., Karp, A., Wierzbicka, S. (2018) Efecto de diferentes pretratamientos de preparación de betaglucanos sobre la calidad del pan fortificado. *Ciencia y tecnología de los alimentos* 38(4), 606-611.
- Li, F., Sun, X., Yu, W., Shi, C., Zhang, X., Yu, H., Ma, F. (2021). Enhanced konjac glucomannan hydrolysis by lytic polysaccharide monoxygenases and ge-

- nerating prebiotic oligosaccharides. *Carbohydrate Polymers* 253, 117241. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117241>
- Li, Y., Wu, Z., Wan, N., Wang, X., Yang, M. (2019). Extraction of high-amylose starch from *Radix Puerariae* using high-intensity low-frequency ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59, 104710. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104710>.
- Lima, A.F.D., Faria, G.W., Souza, C.R., Tiwari, B.K., Cullen, Maria, F.J., Bourke, P., Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S. (2017). Fructooligosaccharides integrity after atmospheric cold plasma and high-pressure processing of a functional orange juice. *Food Research International*, 102, 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.072>.
- Liu, X., Yang, S., Ma, J., Yu, J., Yan, Q., Jiang, Z. (2020). Efficient production of acetylated xylooligosaccharides from Hawthorn kernels by a xylanase from *Paecilomyces aeruginus*. *Industrial Crops and Products*, 158, 112962. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112962>.
- Mano, M.C.R., Neri-Numa, I.A., da Silva, J.B., Paulino, B.N., Pessoa, M.G., Pastore, G.M. (2018). Biotecnología de oligosacáridos: un enfoque de la revolución prebiótica en la industria. *Microbiología y biotecnología aplicadas* 102(1), 17-37.
- Martínez-Monteagudo, S.I., Enteshari, M., Metzger, L. (2019). Lactitol: Production, properties, and applications. *Trends in Food Science & Technology* 83, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.11.020>.
- Mariana, T., Machado C., Eça, K.S., Vieira, G.S., Menegalli, F.C., Martínez, J., Hubinger, M.D. (2015). Prebiotic oligosaccharides from artichoke industrial waste: evaluation of different extraction methods. *Industrial Crops and Products* 76, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.047>
- Medeiros, A., Alves-Santos C.S., Araújo S.G., Carielo, L.M., Veloso, N.M. (2020). Prebiotic effect of dietary polyphenols: A systematic review. *Journal of Functional Foods* 74, 104169. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104169>
- Meullemiestre, A., Breil, C., Abert-Vian, M., Chemat, F. (2017). Manothermosonication as a useful tool for lipid extraction from oleaginous microorganisms, *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 216-221, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.01.014>.
- Miremadi, F., Sherkat, F., Stojanovska, L. (2016). Hypocholesterolaemic effect and anti-hypertensive properties of probiotics and prebiotics: A review. *Journal of Functional Foods* 25, 497-510. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.06.016>.
- Mojzer, E.B., Knez H.M., Škerget, M., Knez, Ž., Bren, U. (2016). Polifenoles: métodos de extracción, acción antioxidante, biodisponibilidad y efectos anticancerígenos. *Moléculas* 21(7)1-38, 10.3390/molecules21070901
- Moorthy, M., Chaiyakunapruk, N., Anne, S.J., Uma D.P. (2020). Prebiotic potential of polyphenols, its effect on gut microbiota and anthropometric/clinical markers: A systematic review of randomised controlled trials. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 634-649. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.036>.
- Nakkarach, A., Withayagiat, U. (2018). Comparison of synbiotic beverages produced from riceberry malt extract using selected free and encapsulated probiotic lactic acid bacteria. *Agriculture and Natural Resources* 52(5), 467-476. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.11.013>.
- Nami, Y., Lornezhad, G., Kiani, A., Abdullah, N., Haghsheenas, B. (2020). Alginate-Persian Gum-Prebiotics microencapsulation impacts on the survival rate of *Lactococcus lactis* ABRINW-N19 in orange juice. *LWT - Food Science and Technology*, 124, 109190. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109190>
- Neri-Numa, I. A., & Pastore, G. M. (2020). Novel insights into prebiotic properties on human health: A review. *Food Research International* 131, 108973. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108973>.
- Peredo-Lovillo, A., Romero-Luna, H.E. Jiménez-Fernández, M., (2020). Health promoting microbial metabolites produced by gut microbiota after prebiotics metabolism. *Food Research International* 136, 109473. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109473>.
- Pintor, J.A., Arjona-Román, J.L., Severiano-Pérez, P., Totosaús-Sánchez, A., Fizman, S. Escalona-Buendía, H.B. (2020). Agave fructans as fat and sugar replacers in ice cream: Sensory, thermal and texture properties. *Food Hydrocolloids* 108, 106032. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106032>.



- Poletto, C., Carine, R.G., Cichoski, A.J., Queiroz, Z.L., Lopes, E.J., Smaniotto, B.J., Wagner, R., Ragagnin, de M.C. (2019). Study of viability and storage stability of *Lactobacillus acidophilus* when encapsulated with the prebiotics rice bran, inulin and Hi-maize. *Food Hydrocolloids* 95, 238-244. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.049>.
- Poletto, P., Pereira, G.N., Monteiro, C.R.M., Pereira, M.A.F., Bordignon, S.E., de Oliveira, D. (2020). Xylooligosaccharides: Transforming the lignocellulosic biomass into valuable 5-carbon sugar prebiotics. *Process Biochemistry* 91, 352-363. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.01.005>.
- Qin, W., Wen, C., Zhang, J., Sedem, D.C., Zhang, H., He, Y., Duan, Y. (2020). Structural characterization and physicochemical properties of arrowhead resistant starch prepared by different methods. *International Journal of Biological Macromolecules* 157, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.096>.
- Ramos-Hernández, J.A., Lagarón, J.M., Calderón-Santoyo, M. (2020). Enhancing hygroscopic stability of agave fructans capsules obtained by electrospraying. *Journal Food Science Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04672-3>
- Rico-Rodríguez, F., Villamiel, M., Ruiz-Aceituno, L., Serrato, J.C., Montilla, A. (2020). Effect of the lactose source on the ultrasound-assisted enzymatic production of galactooligosaccharides and gluconic acid. *Ultrasonics Sonochemistry* 67, 104945. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104945>
- Rivera-Quixchan, J.M., González-Cortés, N., García-Zarracino, R., Jiménez-Vera, R., Componentes prebióticos del plátano: fibra dietética y almidón resistente División Académica Multidisciplinaria de los Ríos, DES Ciencias Naturales 2 Universidad Juárez Autónoma de Tabasco 1, Universidad Autónoma del Carmen 2 Tenosique, Tab. 1, Ciudad del Carmen, Camp. 2; México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. Pp. 40-50. Vol. 5 No. 3
- Rodrigues, F.J., Cedran, M.F., Bicas, J.L., Sato, H.H. (2020). Encapsulated probiotic cells: Relevant techniques, natural sources as encapsulating materials and food applications – A narrative review. *Food Research International* 137, 109682. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109682>
- Santana, A.L., Macedo, G.A. (2019). Challenges on the processing of plant-based neuronutraceuticals and functional foods with emerging technologies: Extraction, encapsulation and therapeutic applications. *Trends in Food Science & Technology* 91, 518-529. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.019>.
- Serrano-Casas, V., Pérez-Chabela, M.L., Cortés-Barberena, E., Totosa, A. (2017). Improvement of lactic acid bacteria viability in acid conditions employing agroindustrial co-products as prebiotic on alginate ionotropic gel matrix co-encapsulation. *Journal of Functional Foods* 38, 293-297. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.09.048>.
- Shah, B.R., Li, B., Al Sabbah, H., Xu, W., Mráz, J. (2020). Effects of prebiotic dietary fibers and probiotics on human health: With special focus on recent advancement in their encapsulated formulations. *Trends in Food Science & Technology* 102, 178-192. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.06.010>.
- Sihui, P., Ning, D., Junyan, R., Zhengbiao, G., Caiming, L., Yan, H., Li, C., Tod P.H., Zhaofeng, L. (2017). Maltoligosaccharide-forming amylase: Characteristics, preparation, and application. *Biotechnology Advances* 35(5), 619-632. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.04.004>.
- Sin, C.W., Yi, K.T., Hadinoto, K. (2016). Effects of adding resistant and waxy starches on cell density and survival of encapsulated biofilm of *Lactobacillus rhamnosus* GG probiotics. *LWT - Food Science and Technology* 69, 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.02.010>
- Singh, M., Thrimawithana, T., Shukla, R., Adhikari, B. (2020). Managing obesity through natural polyphenols: a review. *Future Foods*, 100002, <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2020.100002>.
- Song, E.J., Han, K., Lim, T.J. (2020). Effect of probiotics on obesity-related markers per enterotype: a double-blind, placebo-controlled, randomized clinical trial. *EPMA Journal* 11, 31-51. <https://doi.org/10.1007/s13167-020-00198-y>
- Tajabadi-Ebrahimi, M., Sharifi, N., Farrokhi, A., Raygan, F., Karamali, F., Razzaghi, R., Taheri, S., Asem, Z. (2017). Un ensayo clínico controlado aleatorio que investiga el efecto de la administración de simbióticos sobre los marcadores del metabolismo de la insulina y los perfiles de lípidos en pacientes diabéticos tipo 2 con sobrepeso con enfermedad coronaria.

- Experimental and Clinical Endocrinología y Diabetes* 125, 21-27
- Tolulope, J.A. (2020). Immune boosting functional foods and their mechanisms: A critical evaluation of probiotics and prebiotics. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 130, 110625. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110625>
- Vera, C., Illanes, A., Guerrero, C., (2020). Enzymatic production of prebiotic oligosaccharides. *Current Opinion in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.013>
- Wang, Y., Guo, Q., Douglas, H., Goff, G. La P. (2019). Oligosaccharides: structure, function and application. L. Melton, F. Shahidi, P. Varelis (Eds.), *Encyclopedia of Food Chemistry*, Academic Press, pp.202-207.
- Wang, Y., Pan, S., Jiang, Z., Liu, S., Feng, Y., Gu, Z., Li, C., Li, Z. (2019). A novel maltooligosaccharide-forming amylase from *Bacillus stearothermophilus*. *Food Bioscience* 30, 100415. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100415>
- Wang, S., Xiao, Y., Tian, F., Zhao, J., Zhang, H., Zhai, Q., Chen, W. (2020). Rational use of prebiotics for gut microbiota alterations: Specific bacterial phylotypes and related mechanisms. *Journal of Functional Foods* 66, 103838, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103838>.
- Wu, Y., Zhang, G. (2018). Synbiotic encapsulation of probiotic *Lactobacillus plantarum* by alginate -arabinoxylan composite microspheres. *LWT - Food Science and Technology* 93, 135-141, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.034>
- Xie, X., Li, X., Ban, X., Zhang, Z., Gu, Z., Li, C., Hong, Y., Cheng, L., Jin, T., Li, Z. (2019). Crystal structure of a maltooligosaccharide-forming amylase from *Bacillus stearothermophilus* STB04. *International Journal of Biological Macromolecules* 138, 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.104>.
- Yan, X., Ye, R., Chen, Y. (2015). Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran. *Food Chemistry* 180, 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.127>
- Yan, X.C., Gänzle, M.G. (2017). Lactose and lactose-derived oligosaccharides: More than prebiotics?. *International Dairy Journal*, 67, 61-72, <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.10.001>.
- Young, S. J., Young-Min, K., Byung-Hoo, L., Sang-Ho Y. (2020). Increasing the dietary fiber contents in isomaltooligosaccharides by dextranucrase reaction with sucrose as a glucosyl donor. *Carbohydrate Polymers*, 230, 115607, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115607>.
- Zaeim, D., Sarabi-Jamab, M., Ghorani, B., Kadkhodae, R. (2019). Double layer co-encapsulation of probiotics and prebiotics by electro-hydrodynamic atomization. *LWT - Food Science and Technology* 110, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.040>
- Zaeim, D., Sarabi-Jamab, M., Ghorani, B., Kadkhodae, R., Liu, W., Hans, T.R. (2020). Microencapsulation of probiotics in multi-polysaccharide microcapsules by electro-hydrodynamic atomization and incorporation into ice-cream formulation. *Food Structure* 25, 100147, <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2020.100147>.
- Zendeboodi, F., Khorshidian, N., Mortazavian, A. M., y da Cruz, A. G. (2020). Probiotic: Conceptualization from a new approach. *Current Opinion in Food Science*, 32, 103-123. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.009>





# Caracterización, alimentación y aprovechamiento de recursos de las familias campesinas: estudio en un municipio del estado de Chiapas

Ramírez-Valverde, Benito<sup>1</sup>  
Velázquez Muñoz, Cristhian Adolfo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Campus Puebla, Colegio de Postgraduados, Puebla, México. ORCID ID: 0000-0003-2482-5667. Correo electrónico: bramirez@colpos.mx

<sup>2</sup> Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario 304, Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria y Ciencias del Mar, Secretaría de Educación Pública, Puebla, México. ORCID ID: 0000-0002-1997-4548.

\* Correspondencia:  
Correo electrónico: cristhianadolfo.velazquez@dgetaycm.sems.gob.mx

Millones de familias mexicanas presentan condiciones de pobreza y su peor expresión se manifiesta en hambre y desnutrición, sobre todo en aquellas personas que habitan en el medio rural. El objetivo del trabajo es caracterizar la familia campesina, y los factores asociados al aprovechamiento de los recursos naturales que proporciona el área forestal para la alimentación y materiales para la construcción de sus viviendas. El estudio se realizó en el municipio de Cintalapa de Figueroa, Chiapas. Este lugar presenta altos niveles de pobreza y marginación. La información se obtuvo utilizando muestreo estadístico para estimar proporciones (cualitativo), con varianza máxima, una precisión de 95 % y confiabilidad del 10 %. El tamaño de muestra quedó establecido en 80 familias. Los resultados muestran que el 87 % de los entrevistados se dedican a la agricultura o la ganadería. El 15 % son hablantes Tzotzil. Los ingresos son reducidos y la mayoría de las familias (71.3 %) se consideran en condiciones de pobreza. Los productores son minifundistas, en su mayoría con tenencia ejidal (88.5 %). En la construcción de la vivienda, el 91.3 % usa algún material proveniente del campo, vereda o bosque. Para la alimentación, la familia campesina emplea todos los recursos con que cuenta, tanto del bosque, la parcela y el traspatio. El 48.7 % de las familias hace uso de productos alimenticios provenientes del bosque. Se concluye que la obtención de alimentos del bosque por parte de las familias campesinas del municipio de Cintalapa de Figueroa, Chiapas está relacionada con la pertenencia a un grupo originario (Tzotzil), así como su apego a la tierra mediante la práctica de la agricultura. Utilizan de manera eficiente todos sus recursos, pero aun así los problemas en la alimentación de la familia campesina persisten.

**Palabras claves:** agricultura campesina; bosque; indígena; pobreza.



## Introducción

De acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2020), con datos de 2018, México tiene el 41.5 % de la población en pobreza y el 10.6 % se encuentra en pobreza extrema, además, de acuerdo con el índice de Gini es uno de los países más desiguales de América Latina y durante el periodo 2016-2018, el 3.6 % de la población se encontraba debajo del nivel mínimo de energía alimentaria. Para el año 2020, el 21.8 % de la población se ubicaba en el área rural y los habitantes de estas regiones se hallaban en peores condiciones de vida que la población urbana.

En México, la nutrición es un problema de gran magnitud, por el porcentaje de la población que no tiene acceso a una alimentación adecuada. Estimaciones de la CEPAL (2021) afirman que en el bienio 2017-2019, en México 8,958,900 personas se encontraban en condiciones de subalimentación, que corresponde al 7.1 % de la población, porcentaje muy similar al 7.2 % global de América Latina y el Caribe. La misma organización (CEPAL, 2021) proporciona información sobre la media de ingresos de los productores de alimentos en pequeña escala, que para el año 2014 en México asciende a 896.49 dólares internacionales constantes de 2011, cantidad insuficiente para que la mayoría de las familias de los productores en pequeña escala tenga condiciones adecuadas de alimentación.

De acuerdo con los datos oficiales que proporciona el CONEVAL (2021), en el año 2018 el 41.9 % de la población mexicana se encontraba en condiciones de pobreza y el 20.4 % de los habitantes presentaban carencias por acceso a la alimentación. En el caso del estado de Chiapas el porcentaje de pobreza fue de 76.4, muy superior al encontrado en el total nacional y presentaban carencias de acceso a la alimentación el 22.3 % de la población. México se encuentra en terribles condiciones de pobreza, ya que millones de habitantes se ubican en esta situación y un alto porcentaje individuos presentan problemas por una alimentación inadecuada.

En este mundo donde existe una gran necesidad de alimentos, por diversas razones se presenta una gran pérdida o desperdicio de comestibles. En 2011, la FAO realizó una estimación donde especifica que anualmente alrededor de una tercera parte de los alimentos del planeta se pierde o desperdicia (FAO, 2019). De acuerdo con esta misma fuente, el desperdicio de alimentos por los consumidores es un problema que se manifiesta con mayor intensidad en los países desarrollados, pero en las economías emergentes se presenta cada vez más este problema, principalmente en los hogares con mayores ingresos. En las familias con recursos limitados no sólo el desperdicio es menor, sino que muchas veces los alimentos son insuficientes y los miembros de la familia tienen que buscar recursos que les permitan complementar las necesidades alimenticias del núcleo familiar.

La falta de víveres es un problema permanente en nuestro país, donde las condiciones de pobreza son extensivas a gran parte de la población. Ante esta falta de alimentos la familia busca complementarlos de diversas formas como recurriendo a la multi-actividad y la migración (Magdaleno-Hernández *et al.*, 2014), que permite obtener ingresos para mejorar sus condiciones de vida. También procura un aprovechamiento óptimo de los recursos que posee, de tal manera que garantice su supervivencia. En esta lógica, las familias con bajo nivel de bienestar tienen menos desperdicio, en este caso, de comestibles.

La respuesta al problema del hambre, de acuerdo con González *et al.* (2018) puede abordarse con dos diferentes visiones, la primera es el sistema lineal mundial y la segunda es la alternativa basada en economía circular, que permita garantizar el derecho a la alimentación la soberanía y la seguridad alimentaria.

Martínez y Porcelli (2018) mencionan que el sistema de producción que rige actualmente se sustenta principalmente en un proceso lineal de consumo de recursos, donde a partir de las materias primas se producen bienes que se utilizan y posteriormente se desechan ocasionando el agotamiento de recursos naturales y generando grandes cantidades de basura. Ante esta perspectiva, surge la llamada economía circular.

Cerdá y Khalilova (2016) establecen una definición de economía circular como “un ciclo de desarrollo continuo positivo que preserva y aumenta el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y minimiza los riesgos del sistema, gestionando stocks finitos y flujos renovables.”

De acuerdo con González *et al.* (2018), la economía circular tiene sustento en tres principios: “1. Preservar y mejorar el capital natural; 2. Optimizar y maximizar el uso de los recursos naturales; y 3. Fomentar la eficacia del sistema”. En este sentido, Hernández-Rodríguez y Llamas-Rodríguez (2020), reportaron que en el año 2019 únicamente el 8.6 % de la producción mundial podría considerarse como una economía circular.

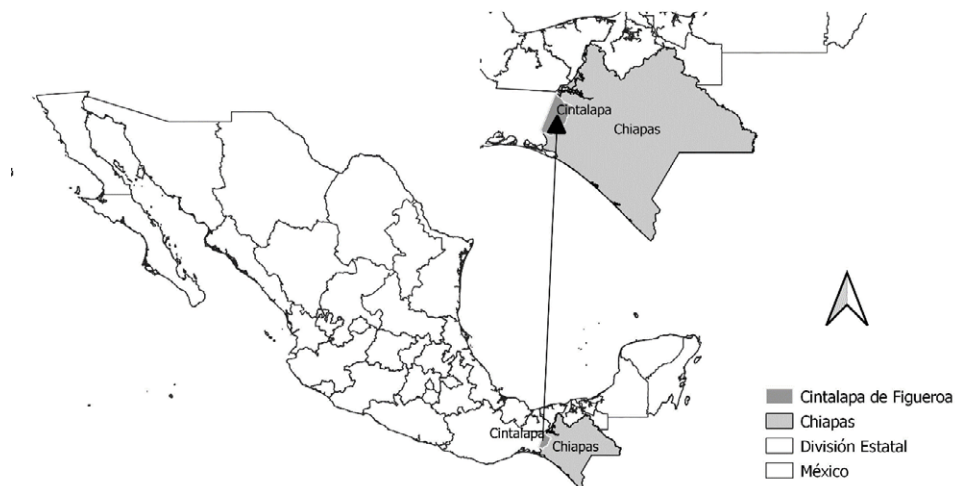
Considerando el aspecto de alimentación, Hernández-Rodríguez y Llamas-Rodríguez (2020), realizaron estudio sobre la pérdidas y desperdicios de alimentos en un ámbito urbano (la ciudad de Guadalajara, Jalisco), bajo el enfoque de economía circular y mencionan que en la pérdida y desperdicio de alimentos influyen aspectos como cultura, educación y sensibilidad de los consumidores finales. Es importante continuar con este enfoque en otros ámbitos como es el sector rural.

Millones de familias mexicanas presentan condiciones de pobreza y su peor expresión se manifiesta en hambre y desnutrición, sobre todo en aquellas que habitan en el medio rural. El objetivo del trabajo es caracterizar la familia campesina, y los factores asociados al aprovechamiento de los recursos naturales que proporciona el área forestal para la alimentación y materiales para la construcción de sus viviendas.

## 1. Materiales y Métodos

El municipio en donde se realizó el estudio, Cintalapa de Figueroa, se encuentra al oeste del estado de Chiapas, en las coordenadas 16° 39' N y 93° 44' W y con una altitud de 540 msnm; sus límites son el municipio de Tecpatán, al oeste con el Estado de Oaxaca, al este con Jiquipilas y Ocozocoautla de Espinosa y al sur con Arriaga (INEFED, 2021). En la *FIGURA 1* se presenta la ubicación del municipio.

Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Cintalapa de Figueroa, Chiapas



Fuente: elaboración propia

El municipio de Cintalapa abarca parte de las Reservas de la Biosfera “La Sepultura y El Ocote”, además del Corredor Biótico Chimalapas-Uxpanapa-El Ocote, en donde predomina la vegetación de bosques de encino-pino (INEFED, 2021).

De acuerdo con SEDESOL (2021), datos oficiales del año 2010, el 75.6 % de la población de Cintalapa se encuentra en condiciones de pobreza y lo más terrible es que el 32.9 % presenta carencias por acceso a la alimentación en el municipio, porcentaje superior al presentado en el estado (30.3 %), que es considerado el más pobre de México y obviamente este porcentaje es mucho mayor al que presenta el país entero, con 24.8 % de los habitantes con problemas para el acceso a la alimentación. Para el año 2015, de acuerdo con CONEVAL (2021) en el municipio de Cintalapa Chiapas, el 70.1 % de la población padece la pobreza y el 30.7 % presenta carencias por acceso a la alimentación. De acuerdo con esos datos oficiales, en un lustro se logró una reducción mínima en los niveles de pobreza, pero siguen persistiendo las terribles condiciones de vida de la población.

En el caso de la vivienda, el 19.2 % de la población considera que reside en casa de mala calidad y el 46.7 % no cuentan con los servicios básicos (SEDESOL, 2021), lo que nos indica las deficientes condiciones en que vive la población de este municipio.

Los datos para realizar esta investigación fueron obtenidos mediante la aplicación de una encuesta. El instrumento fue un cuestionario con 99 reactivos. Para definir la muestra se utilizó un muestreo para estimar proporciones (cualitativo) con varianza máxima. El tamaño de muestra se calculó mediante la siguiente ecuación (Gómez, 1979):

$$n = \frac{NZ_{\alpha/2}^2 (0.25)}{Nd^2 + NZ_{\alpha/2}^2 (0.25)}$$

Donde:

- n= es el tamaño de muestra
- N=Tamaño de la población. Se consideró como marco de muestreo a 457 ejidatarios
- $Z_{\alpha/2}^2$ = valor de Z (distribución normal estándar). La confiabilidad fue de 95 % ( $Z_{\alpha/2}^2=1.96$ ).
- d= precisión (10 %)

El tamaño de muestra quedó definido en 80 familias. De acuerdo con los objetivos del trabajo, se procedió a clasificar a los productores en dos grupos, de acuerdo a si obtienen o no alimentos del bosque. Para el análisis estadístico se utilizaron pruebas de t para dos medias independientes, pruebas de ji cuadrada y regresión logística binominal.

## 2. Resultados y Discusión

El estado de Chiapas es considerado el más pobre del país y consecuentemente, en el municipio de Cintalapa las condiciones de vida de la población rural son bastante difíciles. Para tener un acercamiento a la situación en que se encuentran las familias, se solicitó al entrevistado una auto clasificación como pobre o no pobre. La población entrevistada cuenta con ingresos reducidos y de acuerdo con los resultados de la encuesta, el 71.8 % de las familias manifestó que se hallan en condiciones de pobreza.

El tamaño promedio de la familia fue de 7.5 miembros ( $s=2.7$ ). En el 15.4 % de las familias hablan Tzotzil. En ese sentido, el gobierno del estado de Chiapas (2012) menciona que varios rasgos de la cultura indígenas se están perdiendo, como la lengua, la música y el vestido, sin embargo, mantienen elementos como las fiestas tradicionales, las danzas y conocimientos de medicina tradicional, así como la fabricación de artesanías. En ese sentido, los grupos indígenas continúan utilizando recursos que proporciona la foresta, como son; las plantas medicinales y materias primas para la elaboración de artesanías.

El promedio de edad de los entrevistados fue de 56.8 años ( $s=13.5$ ). El 94.9 % de los que proporcionaron información sobre la familia fueron varones. Respecto al estado civil, el 80.8 % son casados, 10.3 % viven en unión libre, 7.7 % solteros y 1.3 % han perdido a su pareja. En la muestra estudiada se encontró que el 34.6 % de los entrevistados no habían asistido a la escuela o habían cursado algún nivel de primaria, el 47.4 % realizó estudios de primaria y el 17.9 % estudió la secundaria.

El 88.5 % de los entrevistados se dedican principalmente a la agricultura o la ganadería, otras actividades; comerciantes (5.1 %), jornaleros (2.5 %), albañiles (1.3 %), entre otros. La finalidad de realizar actividades para la agricultura es proporcionar ingresos adicionales que le permitan mejorar las condiciones de vida de la familia.

La superficie promedio dedicada a la agricultura fue de 3.2 ha ( $s=1.32$ ), con un rango que va desde 1 ha hasta 15 ha. El 89.5 % de los terrenos agrícolas son ejidales, un 7.9 % son propiedad privada y un 2.6 % presentan tenencia comunal. El tipo de agricultura realizada es principalmente de acuerdo a la temporada con cultivos como maíz, frijol, cacahuete y café, entre otros.

El alimento que se consume con mayor frecuencia es el maíz, que en un 70 % proviene de la parcela, 6.3 % se obtiene del traspato y el 23.7 % de las familias que se ven obligadas a comprar este alimento en el mercado para complementar su consumo. En los hogares con limitados recursos, la mayor parte de los gastos del hogar se destinan a la alimentación. En el caso de las familias estudiadas, la situación es similar y el 74.4 % de los gastos se dedican a la alimentación, el 14.1 % a gastos relacionados con salud, 9 % a la educación y un 2.6 % a la vivienda.

A pesar de que la mayor parte del gasto se destina a la alimentación, la mayoría de las familias (56.4 %) considera que existen problemas para abastecer a su hogar de alimentos. Las causas a las que atribuyen la escasez de alimento son principalmente: no alcanza el dinero (32.9 %); bajos precios de las cosechas (12.3 %); bajo salario (12.3 %); poca producción de alimentos en el campo (8.2 %); aumento del costo de los insumos (8.2 %); falta de empleo (6.8 %); baja producción por cambio climático (6.8 %); poco apoyo por parte del gobierno para la producción (5.5 %); e incidencia de plagas y enfermedades (4.1 %). Ante esta situación, el 41 % de los entrevistados consideró que no tienen una estrategia definida para abastecer sus hogares, sin embargo, el 43.6 % menciona que es necesario laborar un mayor número de horas, un 9 % considera la opción de irse a trabajar a otro lugar y finalmente un 8.4 % considera que la solución es reducir su alimentación. Ante esta problemática, se plantea analizar el uso de los recursos naturales, principalmente el bosque, para proveer alimentos y otros bienes a las familias. Se procedió a clasificar a las familias que utilizan el bosque para obtener algunos alimentos que permitan complementar la dieta. El resultado muestra que aproximadamente la mitad de las familias (48.7 %) hace uso de productos alimenticios provenientes del bosque.

Por otra parte, el estado ha implementado programas de apoyo a los habitantes del municipio, pero de acuerdo con Palacios-Vázquez *et al.* (2017) estas intervenciones son diferenciadas respecto a género y las mujeres son excluidas de los proyectos encaminados al aprovechamiento de especies forestales maderables.

Para conocer los factores que influyen para que las familias del municipio y comunidades rurales obtengan productos alimenticios del bosque, se procedió a comparar variables considerando los dos grupos: Grupo 1) Familias que recolectan alimentos del bosque; Grupo 2) Familias que no obtienen alimentos en el ámbito forestal.

Una variable comparada fue la edad del jefe de familia y se encontró que la edad en el grupo de las familias que obtienen alimentos del bosque el promedio de edad fue de 56.8 años ( $s=15.34$ ), ligeramente menor que el grupo que no tiene alimentos (57.8 años;  $s=11.63$ ), sin que se encontrara diferencia estadística entre los dos grupos ( $t=0.651$ ;  $p=0.516$ ). se podría pensar que los habitantes de mayor edad tienen mayor conocimiento del bosque, sin embargo, los resultados indican que la edad no es un factor importante para tomar la decisión de buscar alimentos en la foresta.

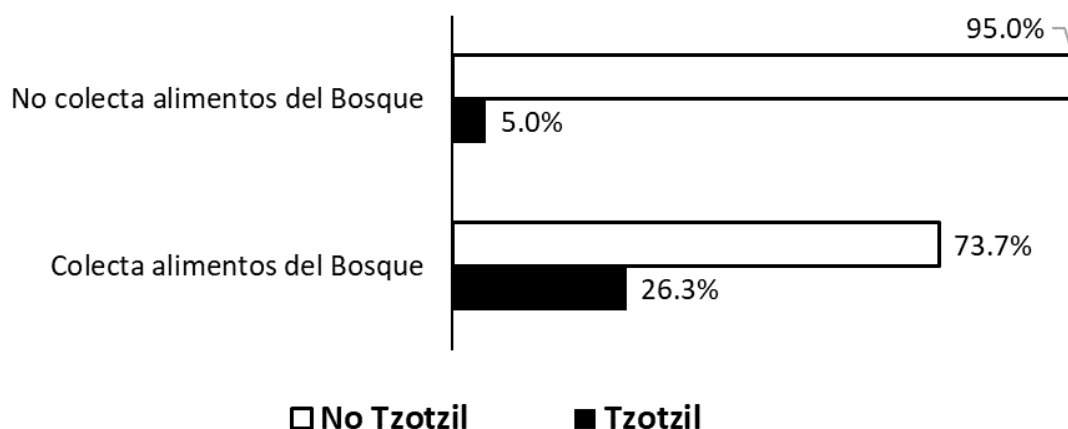
En el Grupo 1, el 34.2 % de los integrantes no tiene escolaridad formal o escasos años de primaria, el 47.4 % alcanzó el nivel de primaria y un 18.4 % tuvo el nivel de secundaria. Para el caso del Grupo 2, las proporciones fueron muy similares, con 35 % de los entrevistados con nivel menor a la primaria, el 47.5 % con nivel primaria y el 17.5 % realizó estudios de secundaria. Mediante prueba de ji cuadrada, se encontró que no existe diferencia significativa entre los dos grupos ( $\chi^2=0.013$ ;  $p=0.99$ ). En ambos grupos se encontró que la escolaridad es reducida.



Una variable que se consideró importante fue el tamaño de la familia, ya que una familia grande requiere una mayor cantidad de alimentos. Sin embargo, al hacer la comparación se encontró que no se presentó diferencia estadística ( $t= 0.68$ ;  $p=0.805$ ) entre los dos grupos, en el Grupo 1 el tamaño promedio de la familia fue de 7.4 ( $s=2.46$ ) miembros y en el Grupo 2 tuvo un número similar con 7.6 ( $s=2.98$ ) miembros en promedio por familia.

Históricamente, los pueblos originarios en México han convivido con la naturaleza y han aprovechado y conservado los recursos naturales. Como se mencionó anteriormente, dentro del municipio estudiado se encuentran familias Tzotziles y al comparar esta variable se encontró mediante prueba de ji cuadrada, que existe diferencia significativa entre los dos grupos ( $\chi^2=6.802$ ;  $p=0.009$ ), como se muestra en la *FIGURA 2*.

Figura 2. Uso de alimentos provenientes del bosque de acuerdo a la pertenencia al pueblo original Tzotzil en el municipio de Cintalapa



Fuente: trabajo de campo.

El grupo Tzotzil, es originario de la región denominada “los altos de Chiapas”, han tenido una migración continua y se han dispersado por diferentes regiones del estado, como lo menciona García (2018). En Cintalapa esta etnia tiene su origen en la migración, pero en este municipio continúan con sus tradiciones y su lengua, practicando agricultura de autoconsumo, cafecultura y la cría de un reducido número de ganado (Esponda, 2009). La pertenencia a un pueblo indígena, en este caso Tzotzil, es un factor importante para hacer uso de los recursos que proporciona el bosque. La mayor parte de las familias indígenas hacen uso de alimentos que se originan en este espacio.

Respecto a las principales actividades del jefe de familia, se encontró que aquellas que consumen alimentos del bosque se dedican principalmente a la agricultura o la ganadería (92.1 %) y el resto practica otros tipo de actividades como: comercio, albañilería y el trabajo de jornaleros. En el caso de las familias que no consumen alimentos del bosque tienen porcentajes similares, siendo la agricultura y la ganadería las principales actividades (85 %) y el resto se dedica a otras actividades.

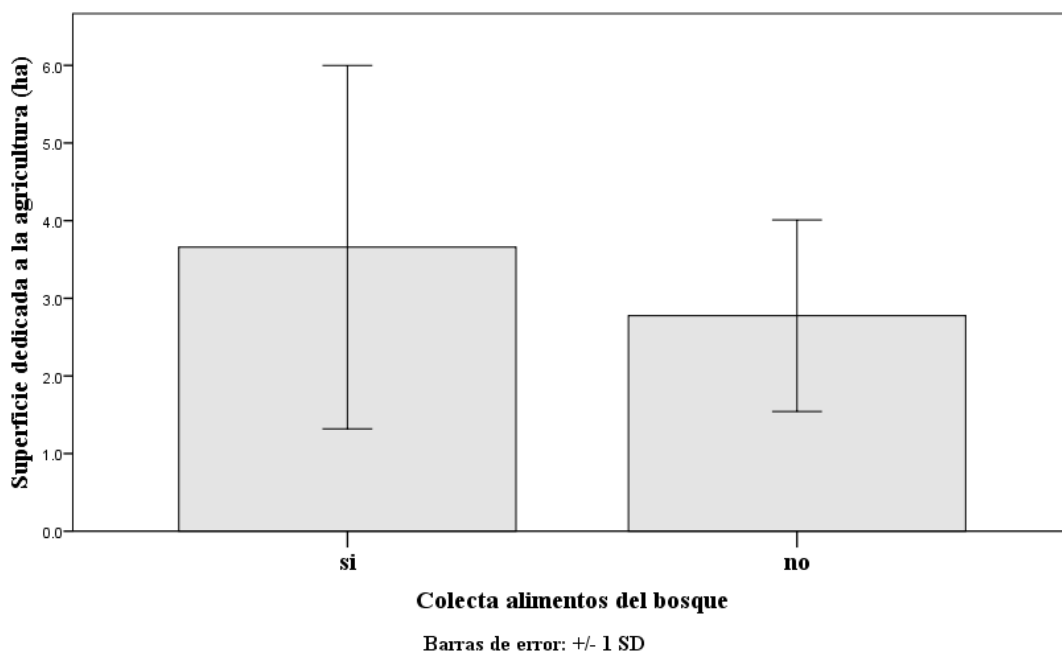
La pobreza es un factor generalizado en el municipio y en ese caso se analizó si esta variable es determinante para obtener alimentos en el bosque. Basados en su propia autoclasificación de pobreza, se encontró que no existió diferencia significativa entre los dos grupos ( $\chi^2=0.748$ ;  $p=0.387$ ). Los porcentajes de las familias que se consideraban pobres que obtenían alimento del bosque fue

de 76.3 % y en el caso del Grupo 2 el porcentaje fue del 67.5 %. En este caso la pobreza no es el factor determinante para ir a buscar alimentos en la foresta, al no ser un carácter distintivo entre los grupos. Es decir, predominan las condiciones de pobreza en toda la población.

La mayor parte de las familias son pobres y consecuentemente el principal gasto que tienen es el de la alimentación. En los dos grupos se encontraron proporciones muy similares en el gasto realizado en el suministro de alimentos: en el Grupo 1 se gastó el 76.3 % del ingreso en alimentación, 2.6 % en aspectos relacionados con la vivienda, 7.9 % en educación y en salud el 13.2 %; y en el Grupo 2, el 72.5 % fue en alimentación, el 2.5 % en vivienda, el 10 % en educación y 15 % del gasto fue dedicado a la salud.

Para las actividades agrícolas, las familias del municipio cuentan con pequeñas superficies. Las prácticas agrícolas realizadas en esos terrenos son la base de su supervivencia. En la *FIGURA* tres se muestra la superficie promedio en cada uno de los grupos estudiados.

**Figura 3. Superficie agrícola promedio de acuerdo al uso de alimentos provenientes del bosque en el municipio de Cintalapa**



Fuente: trabajo de campo.

Al comparar los dos grupos se encontró que en el Grupo 1 tenían en promedio 3.66 ha ( $s=2.34$ ) y en el Grupo 2 alcanzaba un promedio de 2.78 hectáreas ( $s=1.23$ ), mediante una prueba de t para muestras independientes se encontró que existe diferencia estadística ( $t=2.05$ ;  $p=0.043$ ) entre los dos grupos. Este resultado muestra que las familias que obtienen alimentos del bosque tienen mayor dedicación a la agricultura, cultivando mayores superficies de tierra.

La tenencia de la tierra en los dos grupos presenta características muy similares, sin que se encontrara diferencia estadística ( $\chi^2=0.725$ ;  $p=0.696$ ) en las proporciones del tipo de tenencia, donde predomina ampliamente los terrenos ejidales. En el Grupo 1, el 92.1 % es ejidal, 5.3 % presenta propiedad privada y el 2.5 % son comunales y en el Grupo 2, el 86.8 % es ejidal, 10.5 % es propiedad privada y el 2.6 % corresponde a terrenos comunales.

En términos generales como los grupos presentan características similares sobre el tipo de agricultura, donde predomina ampliamente la practicada en condiciones de temporal y se siembra cultivos como maíz, frijol y cacahuete, así como cultivos intercalados.

La cría de ganado es una actividad realizada por la mayoría de las familias. En el caso del Grupo 1, se encontró que el 84.2 % realiza esta actividad y en el caso del Grupo 2 el porcentaje alcanza un valor de 90. Mediante prueba de ji cuadrada se encontró que no existió diferencia estadística ( $\chi^2=0.584$ ;  $p=0.445$ ) entre estos dos grupos. La ganadería proporciona alimentos e ingresos a las familias campesinas, sin embargo, en este caso no es un factor determinante para la búsqueda de alimentos en el bosque. Respecto al tipo de ganadería que practican, en el Grupo 1, el 56.3 % realiza ganadería de traspato, un 21.9 % ganadería extensiva y el 21.9 % tienen ganadería mixta; en el Grupo 2, el 61.1 % cuenta con ganadería de traspato, el 11.1 % extensiva y el 27.8 % realiza esta actividad en forma mixta. En este caso tampoco se encontró diferencia significativa ( $\chi^2=1.518$ ;  $p=0.468$ ) entre los grupos. En la superficie de potrero con que contaban las familias tampoco se encontró diferencia estadística ( $t=0.71$ ;  $p=0.957$ ) respecto a la superficie. En el caso del Grupo 1 el promedio fue de 14.05 hectáreas ( $s=12.12$ ) y para el Grupo 2, la superficie promedio fue de 13.88 ha ( $s=13.63$ ). Las actividades ganaderas entre los dos grupos son muy similares.

Respecto a la tenencia de la tierra en la superficie dedicada a los potreros se encontró que en el Grupo 1, el 81.8 % corresponde a terrenos ejidales y el restante 18.2 % tenían sus terrenos bajo la figura de propiedad privada. En el caso del Grupo 2, el 95.5 % corresponde a terrenos ejidales y el 4.5 % a propiedad privada. La tenencia predominante en los potreros de los entrevistados corresponde a terrenos ejidales.

El bosque es de gran importancia para las familias del municipio. Respecto al Grupo 1 se encontró que poseen 6.66 ha en promedio ( $s=7.95$ ), y el Grupo 2 contaba con 4.61 ha ( $s=6.38$ ), sin que se encontrara diferencia estadística entre los dos grupos ( $t=0.915$ ;  $p=0.366$ ). La superficie de bosque que le corresponde cada familia es pequeña y respecto a la tenencia, en el Grupo 1, el 77.3 % es propiedad ejidal y el 22.7 % es propiedad privada; y en el Grupo 2, el 95 % corresponde a terrenos ejidales y 5 % a propiedad privada sin que se presente diferencia estadística ( $\chi^2=2.689$ ;  $p=0.101$ ) entre los dos grupos.

Otra fuente de ingresos y alimentos para la familia son los huertos familiares y en el Grupo 1, el 52.6 % cuenta con estos espacios de producción; y en el 43.8 % de las familias del Grupo 2, tienen su huerto familiar. Un factor importante en la alimentación es el traspato, donde cultivan algunas plantas alimenticias, medicinales y ornato; además cuentan con animales para su alimentación y en caso de necesidad para venta. La alimentación de la ganadería de traspato proviene principalmente de la actividad familiar (77.5 %), un 6.3 % compra alimentos y el resto utiliza ambas.

Para conocer cuáles variables intervienen en conjunto con la decisión de obtener alimentos del bosque, se procedió a utilizar un modelo de regresión logística binaria, donde la variable respuesta es la obtención o no de alimentos del bosque. Mediante un procedimiento de selección de variables, se probaron aquellas que podrían participar en la decisión de utilizar productos del bosque en la alimentación de la familia. Después de desechar un amplio número de variables, el modelo seleccionado quedó definido por sólo dos variables: ser una familia de origen Tzotzil y la superficie agrícola, como se observa en el cuadro siguiente:

Cuadro 1. Resultado de la selección de modelo de regresión logística binaria para la variable respuesta obtienen o no alimentos del bosque

| Variable            | Estimador B | Error estándar | Prueba de Wald | Grados de libertad | Significancia | Exp(B) |
|---------------------|-------------|----------------|----------------|--------------------|---------------|--------|
| Tzotzil             | -1.933      | 0.844          | 5.245          | 1                  | 0.022         | 0.145  |
| Superficie Agrícola | -0.394      | 0.193          | 4.171          | 1                  | 0.041         | 0.674  |
| Constante           | 1.481       | 0.657          | 5.077          | 1                  | 0.024         | 4.396  |

Fuente: obtención propia a partir de los resultados de campo.

El resultado nos muestra que la obtención de alimentos del bosque por parte de las familias campesinas del municipio está relacionada con la pertenencia a un grupo originario (Tzotzil), así como su apego a la tierra mediante la práctica de la agricultura en terrenos de mayor dimensión.

Es necesario mencionar que el uso de los recursos forestales presenta una serie de problemas como la reducción del área forestal debido a la tala inmoderada y el establecimiento de nuevas áreas para la ganadería o la agricultura de cultivos básicos para la sobrevivencia de las familias campesinas (Gobierno Municipal de Cintalapa de Figueroa, 2008). Otro tipo de problema del aprovechamiento federal forestal es la afectación de la presencia de vertebrados terrestres que, aunque algunos de ellos pueden ser tolerantes a la explotación actual, otros tienden a desaparecer (Espinoza-Medinilla *et al.*, 2018).

En las familias indígenas del municipio, consecuentemente con sus condiciones socioeconómicas, las viviendas son precarias y en ese sentido del Gobierno del estado de Chiapas (2012) menciona que las casas en que viven los indígenas del municipio se caracterizan por poseer sólo una o dos habitaciones, con preparación de los alimentos a ras de tierra o en fogones, sin servicios y construidas con materiales de la región, aunque se presenta una tendencia a cambiar hacia materiales industrializados.

De acuerdo con el Gobierno Municipal de Cintalapa de Figueroa (2008), en las zonas rurales del municipio las viviendas de adobe y tejas son predominantes y en las comunidades de mayor marginación, la mayoría utilizan materiales en sus construcciones como la madera y tejas de cartón. Es claro que las familias de menores recursos buscan en los recursos forestales elementos que les ayuden a mejorar sus casas habitación.

En el Grupo 1, además de utilizar alimentos del bosque, la totalidad de este grupo emplea algún material proveniente del campo para el aprovechamiento de la familia y en el Grupo 2, a pesar de que no tiene alimentos del bosque, un alto porcentaje de ellos (82.5 %) utiliza materiales provenientes del campo. Eso significa que el 91 % de los entrevistados procedió a utilizar materiales provenientes del campo, principalmente para construcción. Respecto a los materiales utilizados, el 65 % de ellos utilizó madera, 16.3 % usó tierra, 10 % empleo grava, 7.5 % arena y un restante 1.3 % otros materiales del campo. Eso significa un aprovechamiento de los recursos naturales que tienen a su alcance para satisfacer sus necesidades. Esto concuerda con lo planteado por González *et al.* (2018) respecto al segundo principio de la economía circular sobre optimizar y maximizar el uso de los recursos naturales.

El uso que se hace del bosque, a pesar de la prohibición existente de protección forestal, en ocasiones es excesivo y en ese sentido, Caspio (2004) menciona que, en algunas comunidades de Cintalapa, se hace una extracción desmesurada está causando problemas de deforestación.

De las actividades agrícolas realizadas se obtienen productos para la alimentación del ganado. En el Grupo 1, el 45.5 % obtiene granos, el 18.2 % forrajes y el 36.4 % utiliza ambos. Para el Grupo 2, el 41.7 % utiliza granos de su agricultura, el 13.9 % forrajes y el restante 44.4 % utiliza ambos insumos. Estos resultados son muy similares y no se encontró diferencia estadística entre ellos ( $\chi^2=0.533$ ;  $p=0.766$ ). La gran mayoría de los insumos provienen de la práctica de la agricultura familiar (88.4 %) y en 7.2 % compra insumos y en 4.3 % usa ambas fuentes.

El uso de productos derivados de la actividad agrícola para la alimentación del ganado ya ha sido reportado en un estudio realizado en el municipio de Cintalapa, específicamente en la comunidad Francisco I. Madero, se encontró que el 78.5 % de los productores cuentan con ganado bovino y de éstos el 95.4 % destina algún porcentaje de rastrojo de maíz para la alimentación de su ganado, además del aprovechamiento de los pastizales (Caballero *et al.*, 2017).

### 3. Conclusiones

Las familias rurales del municipio analizado se encuentran, en términos generales, en condiciones de pobreza y marginación. Presentan serios problemas para la obtención de alimentos suficientes y adecuados, por lo que tienen que buscar alternativas para la obtención de recursos que le permitan mejorar su alimentación. En términos generales, los habitantes de esta región tienen limitaciones en la obtención de alimentos por lo que éstos no son desperdiciados y se buscan optimizar sus recursos. Para la alimentación, la familia campesina emplea todos los recursos con que cuentan, tanto del bosque, la parcela, así como el traspatio.

Una de las alternativas para mejorar su alimentación es la búsqueda de productos alimenticios que proporcionan el bosque y el campo en general. El resultado nos muestra que la obtención de alimentos del bosque por parte de las familias campesinas del municipio está relacionada con la pertenencia a un grupo originario (Tzotzil), así como su apego a la tierra mediante la práctica de la agricultura terrenos con mayores superficies.

No solamente en la alimentación utilizan los recursos que proporciona la naturaleza, también se emplean en aspectos como construcción y mejoramiento de sus viviendas. Cabe resaltar el uso adecuado de sus recursos, como se manifiesta en la utilización de residuos de sus cosechas para la alimentación de ganado.

Las familias campesinas utilizan de manera eficiente todos sus recursos, pero aun así los problemas en la alimentación de la familia campesina persisten.

**Conflictos de intereses:** “Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

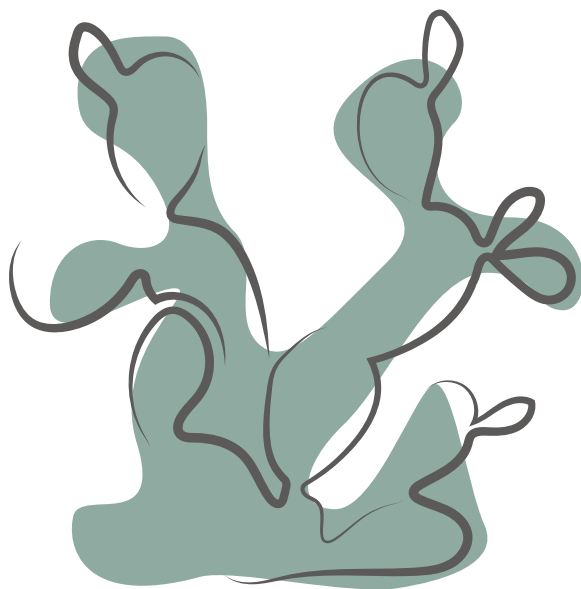
## 4. Referencias

- Caballero, J. C., Moreno, A., Reyes, J. L., Valdez, J. S., López, W., Jiménez, J. A. (2017). Competencia del uso del rastrojo de maíz en sistemas agropecuarios mixtos en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 91-104.
- Carpio, C. (2004). La Colonización de la frontera Chimalapa: lucha por la apropiación territorial. *Espiral*, X (29), 161-198.
- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía industrial*, 401, 11-20.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2021). CEPALSTAT/bases de datos y publicaciones estadísticas. Disponible en: [https://estadisticas.cepal.org/cepalstat/web\\_cepalstat/buscador.asp?string\\_búsqueda=alimentaci%20F3n](https://estadisticas.cepal.org/cepalstat/web_cepalstat/buscador.asp?string_búsqueda=alimentaci%20F3n). Accesado: 12 enero 2021.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2020). *Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe, 2019*. Santiago de Chile.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2021). Medición de la pobreza. *Pobreza en México. Resultados de pobreza en México 2018 a nivel nacional y por entidades federativas*. Disponible en: <https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza-2018.aspx>. Accesado: 18 enero 2021.
- Espinoza-Medinilla, E., Torres-Romero, E. J., Taran-go-Arámbula, L. A. (2018). Registros adicionales de mamíferos silvestres en el área de aprovechamiento forestal: Los Ocotones Chiapas, México. *Agrociencia*, 52(4), 553-562.
- Esponda Jimeno, Víctor Manuel (2009), Migración y colonización de tzotziles en los municipios de Cintalapa y Jiquipilas. En: *Medio ambiente, antropología, historia y poder regional en el occidente de Chiapas y el Istmo de Tehuantepec*, (Lee Whiting, Thomas A., Davide Domenici, Víctor M. Esponda Jimeno y Carlos Uriel del Carpio Penagos (coords.), pp. 411-422. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- FAO. (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. Roma.
- García-Alejos, J. (2018). *El principio fundacional en la mitología y el ritual entre los tzotziles de San Andrés Larráinzar*. *Estudios de Cultura Maya*, LII: pp. 139-160.
- Gobierno del Estado de Chiapas. (2012). *Plan de la Microrregión Norte de Cintalapa de Figueroa, El Arco del Tiempo para el Desarrollo con Identidad*. Disponible en: <https://www.unich.edu.mx/wp-content/uploads/2013/06/OCOZOCAUTLA-2012.pdf>. Accesado: 17 enero 2021.
- Gobierno Municipal de Cintalapa de Figueroa. (2008). *Plan de Desarrollo Municipal del municipio de Cintalapa de Figueroa 2008-2010*. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Estatat/Chiapas/Todos%20los%20Municipios/wo48182.pdf>. Accesado: 17 enero 2021.
- Gómez A. R. (1979). *Introducción al muestreo*. Tesis de Maestría en Ciencias en Estadística. Centro de estadística y cálculo. Colegio Postgraduados. Chapingo México
- González, J., M, Ovalle & M, Salazar. (2018) *La Economía Circular como Respuesta Alternativa a los Desafíos de la Alimentación: Análisis de caso para la situación de Chile*. *Rev. chil. relac. Int*, vol II (2): 94-104
- Hernández-Rodríguez, C., Llamas-Rodríguez, F. J. (2020). Desperdicio de alimentos y tiempo disponible para trabajo doméstico ¿Están correlacionados? Estudio exploratorio en un contexto urbano. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 30(56).
- INAFED (2021). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, estado de Chiapas, Cintalapa*. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM07chiapas/municipios/07017a.html>. Accesado: 17 enero 2021.
- Magdaleno-Hernández, E., Jiménez-Velázquez, M. A., Martínez-Saldaña, T., & Cruz-Galindo, B. (2014). *Estrategias de las familias campesinas en pueblo nuevo, municipio de Acambay, Estado de México*. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 11(2), 167-179.
- Martínez, A. y Porcelli, A. (2018). *Estudio sobre la economía circular como una alternativa sustentable frente al ocaso de la economía tradicional (Primera parte)*. *Lex*, núm. 22, pp. 303-333.

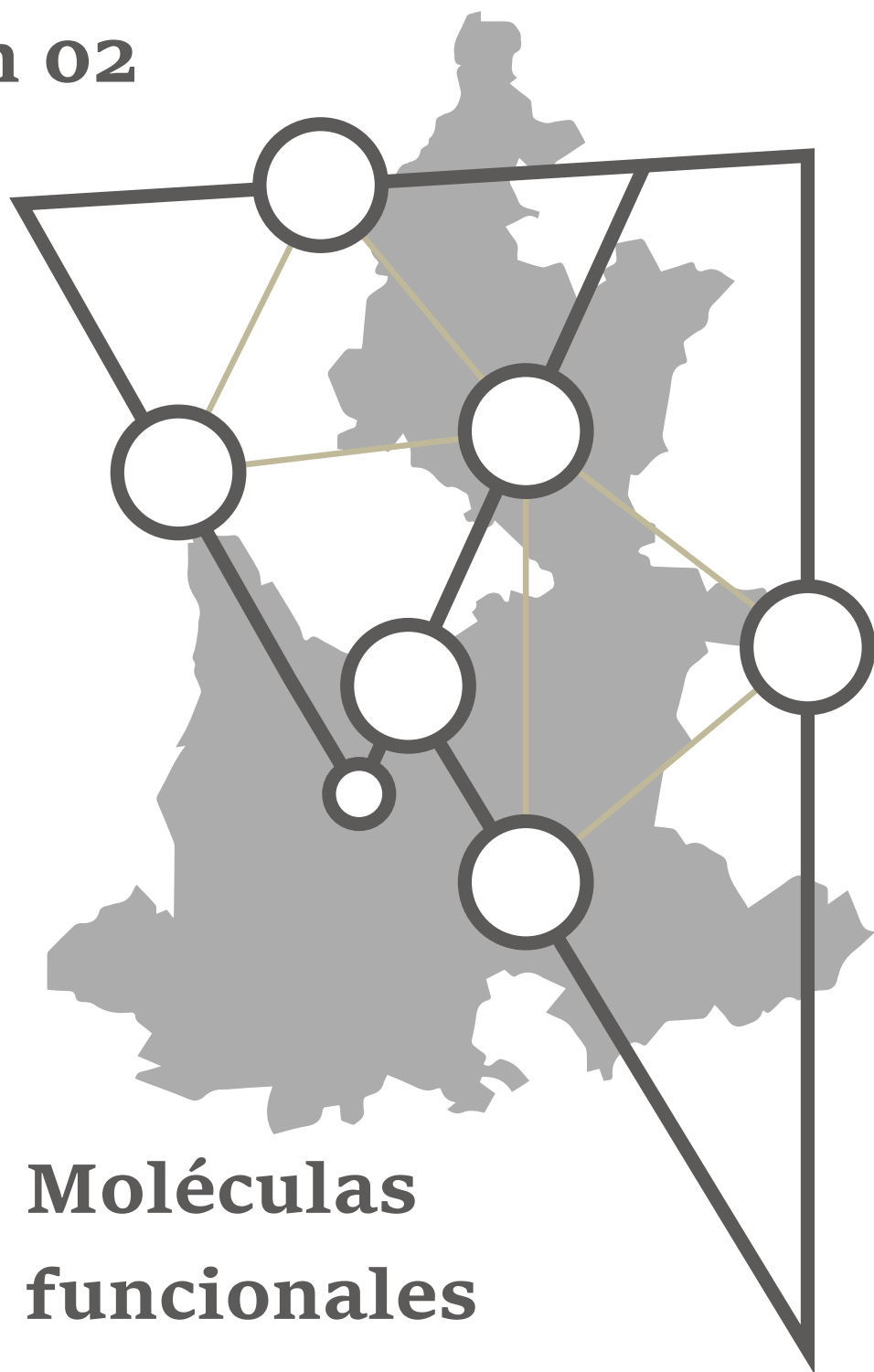


Palacios-Vázquez, A. L., Pérez-Nasser, E., & Pérez-Olvera, M. A. (2017). *Instituciones públicas y relaciones de género en el manejo forestal sustentable, Cintalapa, Chiapas*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(spe 18), 3785-3797.

Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) (2021). *Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social, Cintalapa, Chiapas*. Disponible en: [http://www.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Informes\\_pobreza/2014/Municipios/Chiapas/Chiapas\\_017.pdf](http://www.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Informes_pobreza/2014/Municipios/Chiapas/Chiapas_017.pdf). Accedido: 17 enero 2021.

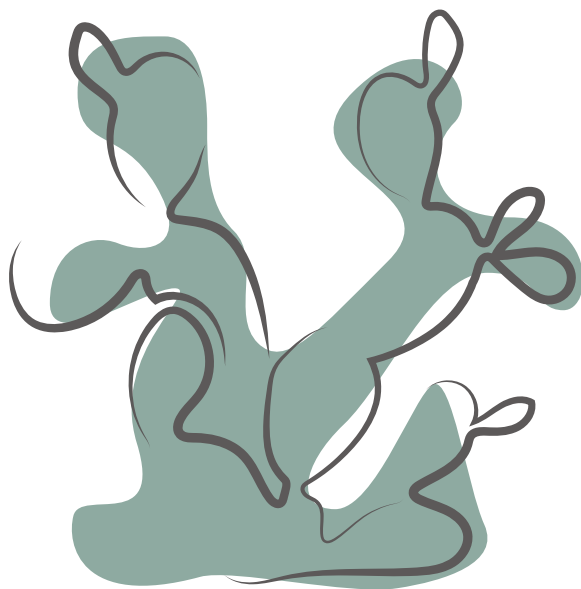


## Sección 02



**Moléculas  
funcionales**





## Evaluación del contenido prebiótico en alimentos endémicos mexicanos: aloe vera (*Aloe barbadensis*), chayote (*Sechium edule*), chía (*Salvia hispanica*) y nopal (*Opuntia ficus-indica*)

Aguilar-Soria, Zaira Ixchel<sup>1</sup>

Pérez-Armendáriz, Beatriz<sup>1</sup>

Nelly-Juárez, Zaida<sup>2</sup>

Cardoso-Ugarte, Gabriel Abraham<sup>3\*</sup>.

<sup>1</sup> Facultad de Biotecnología, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla, México

<sup>2</sup> Facultad de Química, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla, México

<sup>3</sup> Facultad de Gastronomía, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla, México

\*Correspondencia

<https://orcid.org/0000-0001-6836-0502>,  
gabrielabraham.cardoso@upaep.mx;  
Tel. (222) 229 9400 Ext. 7018

El contenido prebiótico en los alimentos juega un papel decisivo en la modulación de la microbioma intestinal. Diferentes estudios han demostrado sus beneficios para el tratamiento de enfermedades intestinales y extraintestinales, ayudando a mantener un estado de equilibrio (eubiosis), en la microbioma intestinal de quien los consume. Además, un bajo consumo de alimentos con prebióticos puede incrementar el riesgo de padecer enfermedades gastrointestinales. Los propósitos de esta investigación fueron evaluar la actividad prebiótica de alimentos endémicos mexicanos (*Aloe barbadensis* Miller, *Sechium edule*, *Salvia hispanica* y *Opuntia ficus-indica*), y cuantificar su actividad antioxidante, para determinar si pueden usarse como ingredientes funcionales en la formulación de alimentos. El efecto prebiótico de los alimentos se determinó a través de la evaluación de la viabilidad de tres bacterias probióticas (*Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum*), empleando cinética de crecimiento en cultivo líquido. Posteriormente, se obtuvieron los extractos etanólicos de sábila, chayote, chía y nopal para las pruebas subsecuentes; dichos extractos se caracterizaron químicamente por medio de FTIR para asociar estructuras con efecto prebiótico. Por último, se determinó el porcentaje de actividad antioxidante de los extractos con el método de reducción del radical DPPH. Las cinéticas de crecimiento de los probióticos probados presentaron crecimientos de 80-141, 90-180, 133-167 y 83-111 de UFC/mL en sábila, chía, nopal y chayote después de 48 horas de incubación a 36 °C. Por su parte, mediante la caracterización química de los extractos etanólicos obtenidos, se obtuvo que las moléculas prebióticas presentes fueron fructooligosacáridos y fructanos. Por último, los IC<sub>50</sub> obtenidos, fueron

314.61, 273.61, 21192, 19077 y 2619 de mL/L para nopal, sábila, chayote y chía, respectivamente. Los resultados obtenidos indican que los alimentos estudiados poseen funcionalidades que pueden ser aprovechados en la formulación de nuevos alimentos.

**Palabras claves:** Actividad antioxidante, alimentos endémicos mexicanos, prebióticos, probióticos



## Introducción

El consumo de los alimentos endémicos mexicanos es recomendado por su mayor calidad nutricional, así como por su cercanía y accesibilidad al consumidor dado que se encuentran a menor distancia para su transporte, lo que a su vez contribuye a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y, sobre todo, crea empleos locales mejorando la economía de la región, facilitando así el desarrollo sostenible y promoviendo la implementación de la economía circular (Sandoval *et al.*, 2017). Por otro lado, la ubicación geográfica de México, permite obtener una gran variedad de alimentos endémicos (Escalona, 2010), los cuales han sido aprovechados para la producción de nuevos

productos, bebidas alcohólicas y no alcohólicas, así como suplementos alimenticios que contienen como ingrediente principal: maíz, vainilla, cacao, quelites, flores comestibles, aguacate, amaranto, calabaza, chayote, chile, chía, jícama, frijol, jitomate, chilacayote, huauzontle, alga espirulina, ejote, nopal, agave, xoconostle, entre otros (Acle y Montiel, 2018).

Además de su aporte nutricional, estos alimentos han demostrado poseer propiedades funcionales que benefician a la alimentación humana y brindan alternativas de creación de nuevos productos a la industria de alimentos (Chamorro y Mamani, 2010). Por ejemplo, en la alimentación, el contenido de fibra previene algunas enfermedades como diabetes, cardiopatías, neoplasias del estómago, aligeramiento del tránsito intestinal, eliminación de grasas, entre otras. Por otra parte, desde un punto de vista tecnológico, la capacidad de retención de agua y aceite de estos macronutrientes, tiene efectos benéficos en los productos alimenticios y efectos fisiológicos en el ser humano (Trejo-Márquez *et al.*, 2017). Al tipo de fibra dietética que contiene componentes o elementos fisiológicamente activos, se le llama fibra funcional o prebiótico (Escudero, 2006).

En este contexto, los prebióticos que una persona puede llegar a consumir de estos alimentos ayudan al crecimiento de la microbioma intestinal y a mantener la eubiosis de la misma, es decir, el crecimiento de los microorganismos que viven en nuestro sistema digestivo que se encargan de realizar varias tareas importantes que favorecen nuestra salud, como por ejemplo, la disminución de afectaciones de enfermedades inflamatorias intestinales, disminución de diarreas infecciosas, aumento de la estimulación del sistema inmunológico, el incremento de la biodisponibilidad mineral, el mejoramiento de problemas asociados con el síndrome metabólico, el control de peso en pacientes con sobrepeso y obesidad, la modificación del estado de ánimo, entre otras.

Adicionalmente, los antioxidantes son otro grupo de compuestos de suma importancia en la dieta humana. Los antioxidantes son moléculas capaces de retardar o prevenir el daño oxidativo de los lípidos, proteínas y ácidos nucleicos que se generan por causas ambientales, como el estrés y por la ingesta de algún contaminante. Estos compuestos son capaces de neutralizar los radicales libres ya que son compuestos bioactivos, es decir, compuestos que aportan un beneficio a la salud más allá de los considerados como nutrición básica. Los antioxidantes pueden prevenir el cáncer, enfermedades cardiovasculares, Alzheimer, diabetes y otros padecimientos causados por el estrés oxidativo (Pokorny y Yanishlieva-Maslarova, 2001).



Debido a lo anterior, el propósito de la presente investigación fue generar información científica para determinar el contenido de prebióticos y capacidad antioxidante de alimentos endémicos mexicanos seleccionados por su disponibilidad: sábila (*Aloe barbadensis* Miller), chayote (*Sechium edule*), chía (*Salvia hispanica*) y nopal (*Opuntia ficus-indica*), a fin de contribuir en la mejora de la calidad de la dieta de los mexicanos y a la selección de los alimentos con una contribución positiva al estado de salud.

## 1. Materiales y Métodos

### 1.1 Materia prima

Los materiales vegetales (chayote, nopal) y la semilla de chía se adquirieron en un supermercado de la ciudad de Puebla, Puebla, mientras que la sábila fue adquirida en un mercado local de la ciudad de Cholula, Puebla. Todos los alimentos fueron adquiridos en el verano del 2019.

### 1.2 Cinética de crecimiento de bacterias probióticas en prebiótico

La cinética de crecimiento probiótico sobre prebiótico se realizó en dos fases: la fase prebiótica y la fase probiótica.

La fase prebiótica se realizó en incubaciones *in vitro*, sustituyendo la glucosa por el prebiótico que se encuentra presumiblemente en los vegetales estudiados (sábila, chayote, chía y nopal). Un kilogramo de cada vegetal se lavó y cortó en cubos de 1 cm para ser deshidratado durante 2 horas a 80 °C en un horno de convección (San-Son, Mod. HCU, México); la muestra deshidratada se licuó con 250 mL de agua destilada y se filtró con papel filtro Whatman no. 40, para la obtención del extracto acuoso que se esterilizó durante 15 minutos a 121 °C en autoclave. Por otro lado, con la finalidad de complementar el medio de crecimiento de las bacterias probióticas, se preparó un litro de sales minerales con 0.27g de  $K_2HPO_4$ , 0.35g de  $K_2HPO_4$ , 0.53g de  $NH_4Cl$ , 75 mg de  $CaC_{12} 2H_2O$ , 100 mg de  $MgC_{12} 6H_2O$  y 20 mg de  $FeC_{12} 4H_2O$ . Finalmente, se prepararon los medios mínimos con 3 tubos de ensayo de 10 mL para cada probiótico en proporción 20:80, 50:50 y 80:20 de extracto acuoso y sales minerales respectivamente, por triplicado.

Para la fase probiótica, se preparó la semilla madre de cada uno de los probióticos con medio selectivo (caldo nutritivo MRS en un pH de  $6.2 \pm 0.2$ ) inoculando 200  $\mu$ l de *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum* (que fueron obtenidos del cepario de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla) en 250 mL del medio. Se incubaron a 36 °C durante 36 horas, luego se inocularon 50  $\mu$ l de la semilla madre a cada medio mínimo de la fase prebiótica (9 tubos de *Lactobacillus brevis*, 9 tubos de *Lactobacillus paracasei* y 9 tubos *Lactobacillus plantarum*). Los tubos se mantuvieron en incubación a 37 °C durante 24 horas en medio anaerobio para determinar su crecimiento. El conteo de microorganismos se realizó en placa de Neubauer, usando un incremento de imagen de 10 X. Finalmente, se estimó la concentración de UFC, los datos se expresaron en función del logaritmo base 10.

### 1.3 Obtención de extractos por maceración con solvente etanólico

La realización de la extracción etanólica por maceración se dividió en cuatro etapas: preparación de la muestra, maceración, filtración y evaporación. En la primera etapa, se pesó un kilogramo de sábila, chayote, nopal y 500 gramos de chía, los vegetales fueron lavados, desinfectados y cortados en cuadros de 1 por 1 cm. En la segunda etapa, los vegetales y la semilla se maceraron por separado en etanol al 96 % de pureza durante 3 días con agitación cada 6 horas. En la tercera etapa, los extractos se filtraron empleando un matraz kitasato y papel filtro Whatman no. 40, separando el material sólido del líquido. Finalmente, los extractos filtrados se concentraron en un rotavapor (HAHNVAPOR, USA) a 110 rpm y 40 °C hasta lograr la evaporación total del etanol.

### 1.4 Determinación de presencia de estructuras prebióticas

La determinación de presencia de estructuras asociadas a actividad prebiótica en los alimentos estudiados se llevó a cabo mediante espectroscopia de infrarrojo con transformada de fourier (FTIR). Para la preparación de la muestra, se colocó una gota de cada uno de los extractos por separado sobre el cristal, utilizando una micropipeta con punta desechable. Se colocó la muestra entre dos discos de bromuro de potasio (KBr), para realizar la lectura en el espectro de IR. Las muestras fueron escaneadas en la región de 4400 a 400  $\text{cm}^{-1}$  y la resolución fue cada 4  $\text{cm}^{-1}$  con un equipo infrarrojo (Bruker, modelo Vertex 70) y para los análisis se utilizó el accesorio de transmisión (Faraldos y Goberna, 2011).

### 1.5 Actividad antioxidante

La actividad antioxidante de los alimentos se determinó mediante la capacidad de reducción del radical 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH) por parte de los extractos etanólicos (Guija-Poma *et al.*, 2015).

La preparación del material se llevó a cabo con la realización de una solución madre de cada uno de los extractos etanólicos obtenidos previamente, disolviendo 10  $\mu\text{L}$  en 1 mL de etanol; posteriormente, con la intención de homogeneizar las muestras, estas se trataron en baño ultrasónico en un equipo de ultrasonido (Branson 3210, USA) durante 6 min a 30 °C.

Por otro lado, se preparó el tubo de ensayo de depuración de radicales libres (método espectrofotométrico) en 3 etapas; un blanco, un control positivo y un control negativo. En la primera etapa, se agregó 1.5 mL de etanol absoluto; después, el control positivo de 0.5 mL de una solución de ácido ascórbico (0.013  $\mu\text{g/mL}$ ) más 0.5 mL de etanol absoluto y 0.5 mL de solución de DPPH 300  $\mu\text{M}$ ; y el control negativo de 1.0 mL de etanol absoluto más 0.5 mL de DPPH. Finalmente, se leyó la absorbancia de cada uno de los tubos en un espectrofotómetro (Genova Plus JENWAY, USA) (Reynoso *et al.*, 2013).

Una vez preparada la solución madre, se realizaron las diferentes diluciones. En el caso del nopal y sábila se diluyeron 10 mg en 2 mL (concentraciones de 83.33  $\mu\text{g/L}$ , 196.65  $\mu\text{g/L}$ , 333.3  $\mu\text{g/L}$ , 833.3  $\mu\text{g/L}$ , 1666.65  $\mu\text{g/L}$  y 2333.3  $\mu\text{g/L}$ ); chayote 80 mg en 2 mL (concentraciones de 533.32  $\mu\text{g/L}$ , 666.66  $\mu\text{g/L}$ , 1333.32  $\mu\text{g/L}$ , 2000  $\mu\text{g/L}$  y 2666.66  $\mu\text{g/L}$ ); y chía 40 mg en 2 mL (concentraciones de 266.66  $\mu\text{g/L}$ , 333.33  $\mu\text{g/L}$ , 666.66  $\mu\text{g/L}$ , 1000  $\mu\text{g/L}$ , 1200  $\mu\text{g/L}$  y 1333.33  $\mu\text{g/L}$ ). En cada dilución se añadieron 0.5 mL de DPPH en solución etanol (300  $\mu\text{M}$ ) para cada tubo de ensayo.

Posterior a la incubación a 37 °C durante 20 minutos en la oscuridad, se determinó la absorbancia de cada solución a 514 nm. Todas las mediciones se realizaron por triplicado. Al finalizar, el porcentaje de actividad antioxidante se determinó a partir de la *ECUACIÓN 1*:

$$\% \text{ Act. antioxidante} = ((\text{Abs control negativo} - \text{Abs muestra}) / (\text{Abs control negativo}) \times 100$$

La actividad antioxidante se expresó como porcentaje de actividad depuradora del radical DPPH (Turkmen *et al.*, 2006).

Alternativamente, para determinar rápidamente el efecto antioxidante de los extractos, se aplicó el método autográfico en cromatografía en capa fina, validado por Castillo (2020). En breve, se colocó 100 µl de cada extracto por separado de manera cuantitativa sobre la placa (revelador solución de DPPH a 300 µM). Para determinar el efecto antioxidante, se observó la presencia o ausencia del halo de decoloración alrededor de las siembras puntuales.

## 1.6 Análisis estadístico

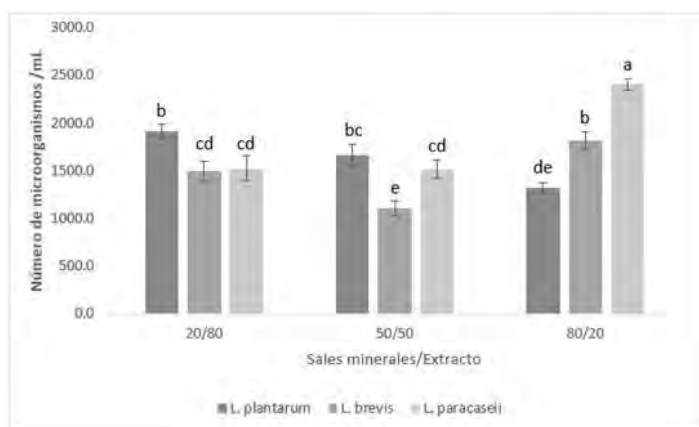
Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software Minitab 19 (Minitab Inc., State College, Pa., EE. UU.). Se realizó una prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 %.

# 2. Resultados y Discusión

## 2.1 Resultados cinética de crecimiento probiótico en prebiótico

En la *FIGURA 1* se presenta el efecto prebiótico del extracto de sábila (*Aloe barbadensis* Miller) sobre el crecimiento de las bacterias probióticas *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum* en diferentes porcentajes de sales minerales con extracto: 20:80, 50:50, y 80:20, respectivamente. Se observa que el mayor crecimiento se registró con *L. paracasei* en proporción 8:2 (sales minerales-extracto de sábila) con 2407 microorganismos/mL, mientras que el menor crecimiento se registró con *L. brevis* en proporción 50:50 de sales minerales y extracto de sábila con 1107 microorganismos/mL.

Figura 1



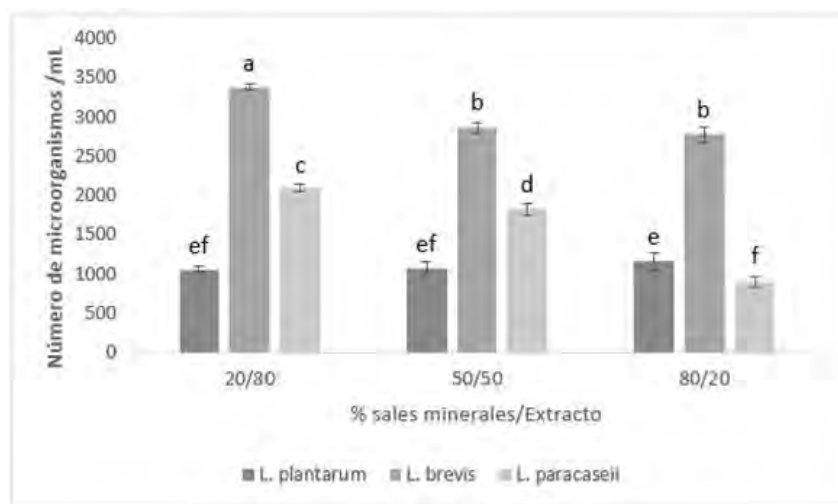
*Efecto prebiótico del extracto de sábila (Aloe barbadensis) sobre 3 microorganismos probióticos (Lactobacillus brevis, Lactobacillus paracasei y Lactobacillus plantarum) con diferentes proporciones de extracto /sales minerales.*

*\*Las barras que comparten una letra no muestran diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).*

En un estudio, González *et al.* (2008) determinaron el efecto del uso de jugo de sábila como prebiótico para obtener cultivos de alta concentración de células de bacterias como *Lactobacillus plantarum* y *Lactobacillus casei* con actividad probiótica. Se determinó la velocidad de crecimiento de cada bacteria en medios con sábila en diferentes concentraciones comparándolos con el crecimiento en medios de cultivo MRS para bacterias ácido lácticas. Los resultados con jugo de sábila al 100 %, obtuvieron cuentas altas de cepas para *L. plantarum* y *L. casei*,  $1 \times 10^9$  y  $1 \times 10^{10}$  UFC/mL respectivamente.

La FIGURA 2 presenta el efecto prebiótico del extracto de chía (*Salvia hispanica*) sobre el crecimiento de las bacterias probióticas *L. brevis*, *L. paracasei* y *L. plantarum* en diferentes porcentajes de sales minerales con extracto de chía: 20:80, 50:50, y 80:20, respectivamente. Se observa un crecimiento mayor en las bacterias *L. Brevis* en la proporción 2:8 con 3387 microorganismos/mL, mientras que el de menor crecimiento se registró en *L. paracasei* con 900 microorganismos/mL.

Figura 2



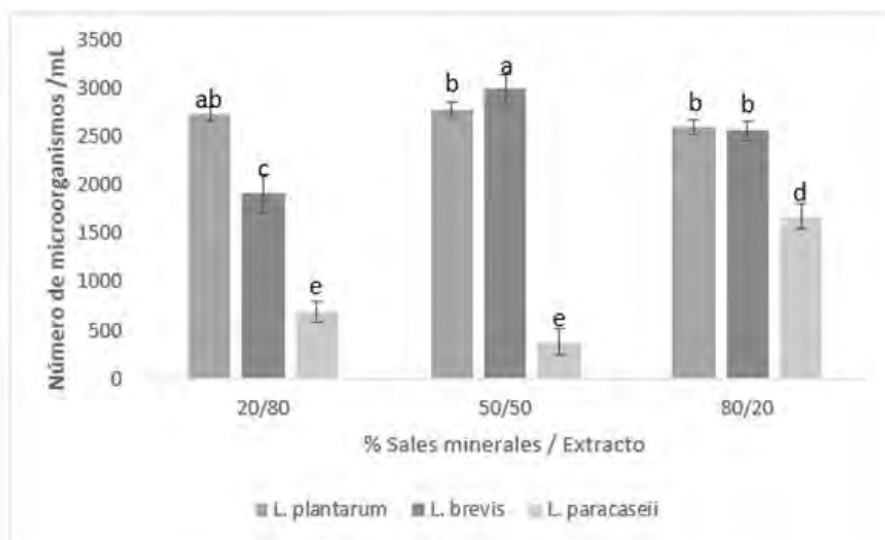
Efecto prebiótico del extracto de chía (*Salvia hispanica*) sobre 3 microorganismos probióticos (*Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum*) con diferentes proporciones de extracto /sales minerales.

\*Las barras que comparten una letra no muestran diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

Carmen y Alissa (2019), evaluaron el efecto prebiótico de la semilla de *Salvia hispanica* en el crecimiento de las cepas probióticas *Lactobacillus casei* ATCC 334 y *Lactobacillus acidophilus* ATCC 4356. La adición de semilla molida de *Salvia hispanica* presentó un efecto en el crecimiento y viabilidad de *Lactobacillus casei* ATCC 334. Compararon la velocidad máxima de crecimiento, el tiempo de generación y el tiempo de viabilidad celular en un medio con semilla de chía y otro sin semilla de chía. Los resultados que se obtuvieron fueron favorables en el medio con semilla de chía, donde presentó un aumento en la velocidad de crecimiento ( $3.9 \times 10^{-1}$  UFC/mL\*h) y una disminución en el tiempo de duplicación ( $46 \pm 3.3$  minutos) en *Lactobacillus casei*. Tal como se reporta en la FIGURA 2, se observa el crecimiento de las cepas probióticas con la adición del extracto de chía como la fuente de carbono más sales minerales como el medio mínimo.

En la FIGURA 3, se presenta el efecto prebiótico del extracto de nopal (*Opuntia ficus-indica*) sobre el crecimiento de las bacterias probióticas *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum* en diferentes proporciones de sales minerales con extracto: 20:80, 50:50 y 80:20, respectivamente. Se observa que el mayor crecimiento se registró con *L. brevis* en la proporción 50:50 con 2993 microorganismos/mL, mientras que el menor crecimiento se registró con *L. paracasei* en la proporción 50:50 con 1680 microorganismos/mL.

Figura 3



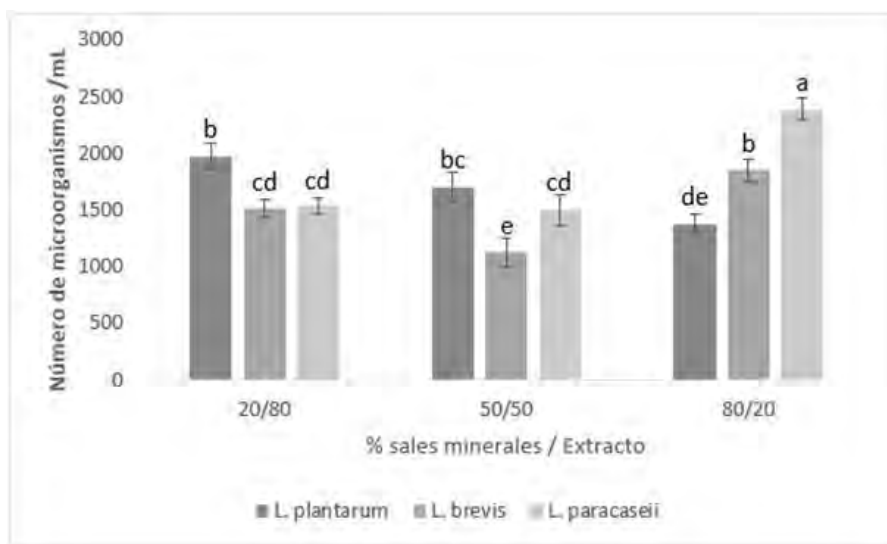
Efecto prebiótico del extracto de nopal (*Opuntia ficus-indica*) sobre 3 microorganismos probióticos (*Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum*) con diferentes proporciones de extracto /sales minerales.

\*Las barras que comparten una letra no muestran diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

Arauz (2009) reportó el contenido de oligosacáridos de pectina y mucílago de nopal y tuna que mostraron actividad prebiótica. Por otro lado, Lugo-Zarates (2018) cuantificó los microorganismos de 4 formulaciones distintas de yogurt con jugo de tuna; en donde se obtuvo un crecimiento de  $1 \times 10^7$ ,  $1 \times 10^8$ ,  $1 \times 10^8$  y  $1 \times 10^6$  de bacterias ácido lácticas en yogurt con jugo liofilizado, yogurt con jugo pasado por ultrasonido liofilizado. Yogurt con colorante y yogurt comercial respectivamente.

La FIGURA 4 presenta el efecto prebiótico del extracto de chayote (*Sechium edule*) sobre el crecimiento de las bacterias probióticas *L. brevis*, *L. paracasei* y *L. plantarum* en diferentes proporciones de sales minerales con extracto de chíá: 20:80, 50:50 y 80:20, respectivamente. Se observa un crecimiento mayor en las bacterias *L. paracasei* en la proporción 80:20 con 2387 microorganismos/mL, mientras que el de menor crecimiento se registró en *L. brevis* con 1520 microorganismos/mL.

Figura 4



Efecto prebiótico del extracto de chayote (*Sechium edule*) sobre 3 microorganismos probióticos (*Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum*) con diferentes proporciones de extracto /sales minerales. \*Las barras que comparten una letra no muestran diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

Sarma *et al.* (2014) utilizaron el chayote como sustrato en la fermentación de bacterias ácido lácticas en jugos no lácteos en donde probaron la evaluación cuantitativa y sensorial. Los resultados que obtuvieron recomendaban el chayote para la preparación de jugos a base de vegetales procesados por la fermentación de bacterias ácido lácticas. Además, su gran aceptación en el mercado por su sabor agrio producido por el ácido láctico de las bacterias ácido lácticas.

De manera general, es importante resaltar que de todos los ensayos de crecimiento de microorganismos probióticos realizados, el mayor crecimiento fue registrado usando chía como sustrato en el crecimiento de *L. brevis* en proporción 20:80 (extracto/sales minerales), con un valor de 3387 UFC/mL, mostrando diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) respecto al resto de los ensayos. Por su parte, el menor crecimiento se registró con *L. paracasei* usando nopal como sustrato en proporción 50:50 de extracto/sales minerales, con un valor de 387 UFC/mL, mostrando también diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) respecto al resto de los ensayos. Además de que el mucílago de chía posee propiedades de retención de agua, formación de geles, y emulgentes, otros estudios han confirmado que posee excelentes propiedades prebióticas. De acuerdo con Xing *et al.* (2017), a pesar de que anteriormente los carbohidratos responsables de dicha actividad eran desconocidos, estos investigadores encontraron que la planteosa es el principal oligosacárido que brinda actividad prebiótica a la semilla. La planteosa es un carbohidrato perteneciente a la familia de oligosacáridos galactosil-sacarosa, los cuales son reconocidos por mejorar el funcionamiento gastrointestinal ya que promueven el crecimiento de bacterias benéficas e inhiben el crecimiento de bacterias patógenas (Daudé *et al.*, 2012).

## 2.2 Presencia de estructuras asociadas a actividad prebiótica en extractos etanólicos

El rendimiento de cada uno de los extractos de sábila (*Aloe barbadensis* Miller), chayote (*Sechium edule*), chía (*Salvia hispanica*) y nopal (*Opuntia ficus-indica*) fueron 28.9 %, 18.6 %, 5.2 % y 23.4 %, respectivamente.

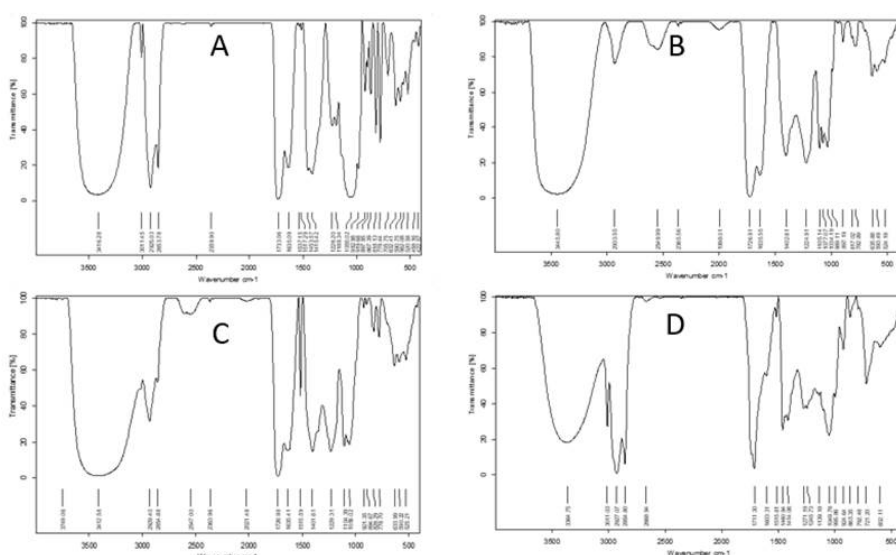
Posterior a la obtención de los extractos etanólicos de sábila (*Aloe barbadensis* Miller), chayote (*Sechium edule*), chía (*Salvia hispanica*) y nopal (*Opuntia ficus-indica*), se procedió a caracterizarlos químicamente por medio de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR). De acuerdo a Brummer (2008), además de las técnicas cromatográficas, esta técnica es una de más utilizadas para la caracterización de hidratos de carbono. Además, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), para evaluar y comprobar los componentes de los prebióticos, deben de caracterizarse adecuadamente. Por ello, es necesario realizar las pruebas para aislar, identificar y caracterizar los carbohidratos prebióticos para relacionar la influencia de la estructura.

En el estudio de García-Curbelo *et al.* (2015), determinaron las características estructurales de los fructanos presentes en el *Agave fourcroydes* de Cuba, con potencialidades de uso como prebiótico en la alimentación animal. Utilizaron 10 tallos de *Agave fourcroydes*, aplicaron la cromatografía en capa delgada, cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas y la cromatografía de intercambio aniónico de alta resolución acoplada a un detector de pulso amperométrico para la caracterización estructural.



En la FIGURA 5A se observa el espectro del chayote en el que se pueden identificar que se encuentra un OH compuesto de enlace simple en un rango de banda de  $3550\text{--}3450\text{ cm}^{-1}$ ; la banda en  $3011.45\text{ cm}^{-1}$  se atribuye a un alqueno monosustituido; la banda  $2925.03$  y  $2853.77\text{ cm}^{-1}$  son alcanos, en  $1733.05\text{ cm}^{-1}$  B-Dicetonas, en la  $1537.14\text{ cm}^{-1}$  vibraciones de tensión N-H y por último en la banda  $1517.29\text{ cm}^{-1}$  compuestos  $\text{C-NO}_2$  aromáticos. En la FIGURA 5B, se muestra el espectro de sábila, en el que se identifica la banda correspondiente al OH de enlaces simples ( $3445.79\text{ cm}^{-1}$ ), luego la banda  $2933.55\text{ cm}^{-1}$  alcanos como vibraciones de tensión del grupo hidroxilo, B-Dicetonas en  $1726.91\text{ cm}^{-1}$ , B-Dicetonas enólicos en la banda  $1635.55\text{ cm}^{-1}$  y un hidroxilo ( $1402.61\text{ cm}^{-1}$ ). En la FIGURA 5C, se observa el espectro de nopal, en el que se puede visualizar la banda correspondiente al OH de enlaces simples ( $3412.57\text{ cm}^{-1}$ ), luego la banda  $2929.39\text{ cm}^{-1}$  de alcanos como vibraciones de tensión del grupo hidroxilo, B-Dicetonas  $1726.98\text{ cm}^{-1}$  y  $1635.41\text{ cm}^{-1}$  y un hidroxilo ( $1401.61\text{ cm}^{-1}$ ). Por último, en la FIGURA 5D, se presenta el espectro de la chía en el que se puede identificar que se encuentra un OH compuesto de enlace simple en un rango de banda de  $3364.75\text{ cm}^{-1}$ ; la banda  $3011.02\text{ cm}^{-1}$  atribuye a un alquenos monosustituidos; la banda  $2927.07\text{ cm}^{-1}$ ,  $2854.79\text{ cm}^{-1}$  y  $2668.93\text{ cm}^{-1}$  son alcanos; en la banda  $1711.29\text{ cm}^{-1}$  B-Dicetonas, en la banda  $1515.81\text{ cm}^{-1}$  un compuesto nitro  $\text{C-NO}_2$  aromáticos y por último en la banda  $1271.18\text{ cm}^{-1}$  y  $1245.72\text{ cm}^{-1}$  fenoles.

Figura 5



Espectros IR de los extractos etanólicos de chayote (*Sechium edule*), sábila (*Aloe barbadensis* Miller), nopal (*Opuntia ficus-indica*) y chía (*Salvia hispanica*).

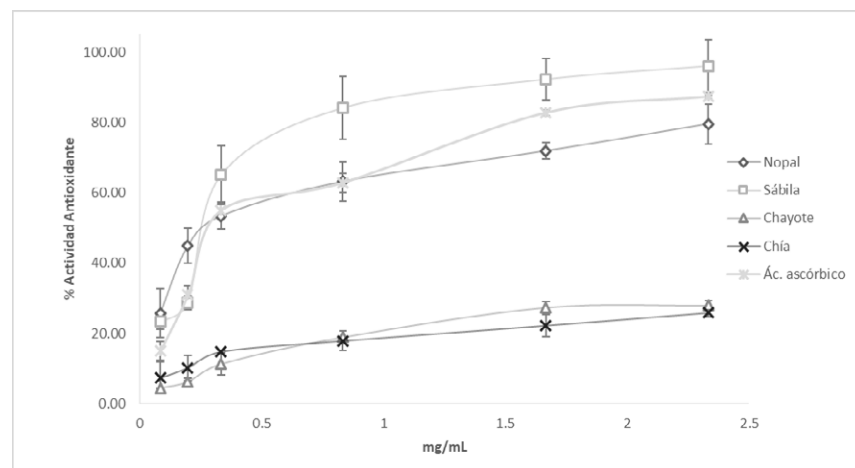
Los resultados obtenidos en la aplicación de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier, indican que las moléculas presentes en sábila (*Aloe barbadensis* Miller), chayote (*Sechium edule*), chía (*Salvia hispanica*) y nopal (*Opuntia ficus-indica*) que se asocian como prebiótico con *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum* para generar una asociación simbiótica fueron fructooligosacáridos y fructanos en la absorción de enlaces entre C u O e H y N e H encontrados en proteínas, hidratos de carbono y péptidos. Específicamente, el análisis de los espectros obtenidos de los extractos, muestra que en todos ellos se detectó la presencia de grupos hidroxilo, alcanos, y dicetonas (pertenecientes al grupo de dicarbonilos). De estos grupos funcionales, la actividad prebiótica es principalmente atribuida al grupo hidroxilo. En este sentido, Zhou *et al.* (2018), señalan que, como es bien sabido, las bacterias ácido lácticas utilizan hidratos de carbono para producir la energía requerida para su reproducción; dichos hidratos de carbono poseen múltiples

grupos hidroxilo que pueden formar puentes de hidrógeno con los grupos polares de proteínas para asegurar la estabilidad proteica, lo que a su vez aumenta la supervivencia de los microorganismos. Igualmente, Thilakarathna *et al.* (2018) señalan que algunos compuestos fenólicos, que son el resultado de la combinación de uno o múltiples grupos hidroxilo con anillos aromáticos de seis carbonos, poseen cualidades prebióticas ya que los microorganismos probióticos son capaces de degradarlos y producir metabolitos fenólicos simples; de esta manera, la microbioma intestinal se ve modificada para favorecer la colonización de microorganismos benéficos.

### 2.3 Actividad antioxidante

En la FIGURA 6, se muestra el porcentaje de actividad antioxidante de los extractos etanólicos de los alimentos evaluados en la investigación comparándolos con la del control (ácido ascórbico). Con la finalidad de calcular el coeficiente de inhibición 50 ( $IC_{50}$ ), se obtuvo la ecuación de regresión de cada una de las curvas. En todos los casos, las curvas de actividad antioxidante mostraron un comportamiento logarítmico ( $R^2 > 0.91$ ), lo que implica que la actividad antioxidante de los extractos está determinada en función del logaritmo de concentración de los mismos. Entre todos los extractos, el de sábila mostró ser el único que superó significativamente ( $p < 0.05$ ) la actividad antioxidante del control, reportando un valor máximo de 95.99 % en la concentración más alta (2.33 mg/mL), mientras que con el ácido ascórbico se obtuvo una actividad de 87.3 % a la misma concentración. Ligeramente por debajo del control, el extracto de nopal mostró una actividad antioxidante de 79.53 % en la misma concentración, siendo significativamente diferente respecto al control ( $p < 0.05$ ) y al resto de los tratamientos. Por su parte, los extractos de chayote y chía son los que mostraron la actividad antioxidante más baja en todas las concentraciones probadas, alcanzando un valor máximo de 27.94 y 25.86 %, respectivamente, en la concentración de 2.33 mg/mL.

Figura 6



*Porcentaje de actividad antioxidante de los extractos etanólicos de nopal, sábila, chayote, chía y control (ácido ascórbico).*

De manera similar, Hu *et al.* (2003) reportaron que los extractos etanólicos de sábila poseen actividad antioxidante equivalente o mayor a BHT y alfa-tocoferol, dos potentes antioxidantes de origen sintético y natural, respectivamente; sin embargo, especifican que aún se necesitan más estudios para comprender los mecanismos de acción. Por su parte, Franco-Quino *et al.* (2016) evaluaron las características fitoquímicas y la capacidad antioxidante *in vitro* de sábila por el método DPPH y su concentración efectiva media ( $CE_{50}$ ) de los extractos y la capacidad antioxidante equivalente a Trolox por el método del ABTS. Los resultados obtenidos de inhibición antioxidante por captación

del radical DPPH y por equivalente Trolox/g extracto mostraron que la sábila tuvo capacidad antioxidante dependiente de la dosis. Esto podría deberse a la presencia de flavonoides glicosilados que se encuentran en las hojas sanas que poseen actividad reductora, además de la presencia de antraquinonas y a sus propiedades hepatoprotectoras, inmunomoduladoras e inhibidores de canales de calcio. Adicionalmente, Nejatizadeh-Barandozi (2013) confirmó la actividad antioxidante de sábila por medio de los ensayos ORAC y FRAP, atribuyéndola a la presencia de polifenoles, indoles y alcaloides en las hojas de la planta.

Finalmente, para comparar los resultados de las diferentes concentraciones de los vegetales y semillas, se reporta el coeficiente de inhibición  $IC_{50}$ , que representa la concentración mínima para la inhibición del 50 % de los radicales libres para el método de decoloración del radical DPPH (Aguirre *et al.*, 2015). El  $IC_{50}$  se calculó mediante la ecuación de la curva (que mostró un comportamiento logarítmico en todos los extractos probados y el control) de cada uno de los extractos vegetales analizados. Los resultados de  $IC_{50}$  obtenidos fueron de 273.61, 314.61, 21 192 y 19 077 mg/L para sábila, nopal, chayote y chía. Al representar la concentración necesaria de muestra para inhibir el 50 % del radical DPPH, el  $IC_{50}$  indica que entre menor sea dicho valor, la muestra, en este caso los extractos etanólicos, poseen una mayor actividad antioxidante. Por lo que, el extracto de sábila fue el único que superó la capacidad antioxidante ( $IC_{50}$  de 273.61 mg/L) del ácido ascórbico, el cual es conocido por su potente capacidad de captación de radicales libres. Asimismo, se confirma que los extractos de chayote y chía poseen una capacidad antioxidante menor al obtener los valores de  $IC_{50}$  más altos.

### 3. Conclusiones

El efecto prebiótico que tienen la sábila (*Aloe barbadensis* Miller), chayote (*Sechium edule*), chía (*Salvia hispanica*) y nopal (*Opuntia ficus-indica*) sobre *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum* fue confirmado al presentar cultivos de alta concentración de células bacterianas con un conteo mínimo de  $1 \times 10^7$  UFC/mL. Las moléculas prebióticas presentes en sábila (*Aloe barbadensis* Miller), chayote (*Sechium edule*), chía (*Salvia hispanica*) y nopal (*Opuntia ficus-indica*) que se asocian como prebiótico con *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus paracasei* y *Lactobacillus plantarum* para generar una asociación simbiótica fueron aquellas con presencia de grupos hidroxilo, incluyendo hidratos de carbono y compuestos fenólicos. Las actividades antioxidantes de sábila (*Aloe barbadensis* Miller) y nopal (*Opuntia ficus-indica*) fueron las más altas entre los vegetales probados, y solo la de sábila mostró ser mayor que la del control. Los cuatro alimentos endémicos mexicanos probados en esta investigación poseen funcionalidad prebiótica que puede ser explotada en la elaboración de alimentos simbióticos; adicionalmente, la potente actividad antioxidante de nopal y sábila los hace aún más atractivos para ser utilizados en la formulación de alimentos funcionales.

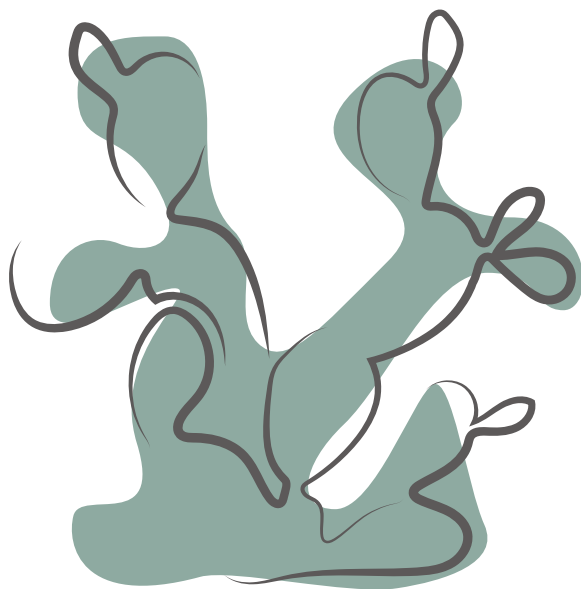
**Agradecimientos:** Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla por las becas otorgadas a la autora Aguilar-Soria durante sus estudios de posgrado.

**Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## 4. Referencias

- Acle, R. S. y Montiel, A. V. (2018). Influencia de la gastronomía mexicana en el consumo étnico en España. *Revista interamericana de ambiente y turismo*, 14(2), 89-101.
- Aguirre, O. E. R., Andrade, W. y López, F. E. D. (2015). Actividad antioxidante de extractos de hojas de *Bocconia frutescens* L. (Papaveraceae). *Revista de tecnología*, 14(2), 21-36.
- Arauz, J. C. G. (2009). Efectos biofuncionales del nopal y la tuna. *Horticultura Internacional*, 18, 71.
- Brunner, Y. y Cui, S. W. (2005). Understanding carbohydrate analysis. En: *Food Carbohydrates: Chemistry, Physical Properties, and Applications*, (S.W. Cui, ed.), Pp. 67-99. Taylor & Francis, Boca Raton, FL.
- Carmen, A. y Alissa, S. (2019). Evaluación del efecto de la semilla de *Salvia hispanica* L. "chía" en el crecimiento de las cepas probióticas *Lactobacillus casei* ATCC 334 y *Lactobacillus acidophilus* ATCC 4356. Tesis de Licenciatura en Biología, Universidad Peruana Cayetano de Heredia, Perú.
- Castillo, H. (2020). Evaluación del potencial como alimento funcional de semillas y pulpa del fruto del patate. Tesis de Maestría en Biotecnología, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México.
- Celis, E. F. (2009). Potencial nutraceutico de cladodios de nopal (*Opuntia* spp.). Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, México.
- Chamorro, R. A. M., y Mamani, E. C. (2010). Importancia de la fibra dietética, sus propiedades funcionales en la alimentación humana y en la industria alimentaria. *Revista de investigación en ciencia y tecnología de alimentos*, 1(1).
- Daudé, D., Remaud-Simeon, M., y Andre, I. (2012). Sucrose analogs: An attractive (bio)source for glycodiversification. *Natural Product Reports*. 29 (9), 945-960.
- Escalona-Aguilar, M. Á. (2010). Los tianguis y mercados locales de alimentos ecológicos en México: su papel en el consumo, la producción y la conservación de la biodiversidad y cultura. Tesis doctoral Sociología Rural, Universidad de Córdoba, España.
- Escudero, E. y González, P. (2006). La fibra dietética. *Nutrición hospitalaria*, 21 (2), 61-72.
- Faraldos, M., y Goberna, C. (2011). Técnicas de análisis y caracterización de materiales. Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España.
- Franco-Quino, C., Muñoz-Espinoza, D., Gómez-Herreros, C., Chau-Miranda, G., Cueva-Piña, L., Guardia-Ortiz, E. y Herrera-Calderón, O. (2016). Características fitoquímicas y capacidad antioxidante in vitro de *Aloe vera*, *Plukenetia volubilis*, *Caiophora carduiifolia*, *Cecropia membranacea*. *Anales de la Facultad de Medicina*, 77(1), 9-13.
- Fukumoto, L. R., y Mazza, G. (2000). Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(8), 3597-3604.
- García-Curbelo, Y., López, M. G., Bocourt, R., Collado, E., Albelo, N. y Nuñez, O. (2015). Caracterización estructural de los fructanos de *Agave fourcroydes* (Lem.) con potencialidades como prebiótico. *Revista Cubana De Ciencia Agrícola*, 49(1), 75-80.
- González, B. A., Domínguez-Espinosa, R. y Alcocer, B. R. (2008). *Aloe vera* como sustrato para el crecimiento de *Lactobacillus plantarum* y *L. casei*. *CYTA-Journal of Food*, 6(2), 152-157.
- Guija-Poma, E., Inocente-Camones, M. Á., Ponce-Pardo, J. y Zarzosa-Norabuena, E. (2015). Evaluación de la técnica 2, 2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH) para determinar capacidad antioxidante. *Horizonte Médico (Lima)*, 15(1), 57-60.
- Hu, Y., Xu, J., & Hu, Q. (2003). Evaluation of antioxidant potential of *Aloe vera* (*Aloe barbadensis* Miller) extracts. *Journal of agricultural and food chemistry*, 51(26), 7788-7791.
- Lugo-Zarate, L. (2018). Propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y antioxidantes de un yogurt líquido adicionado con un liofilizado de jugo de tuna púrpura (*Opuntia ficus indica*) ultrasonificado. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Nejatzadeh-Barandozi, F. (2013). Antibacterial activities and antioxidant capacity of *Aloe vera*. *Organic and medicinal chemistry letters*, 3(1), 1-8.
- Pokorny, J., y Yanishlieva-Maslarova, N. (2001). Antioxidantes de los alimentos, aplicaciones prácticas. Ed. ACRIBIA SA. Zaragoza, España.
- Reynoso, M. A., Vera, N., Aristimuño, M. E., Daud, A. y Riera, A. S. (2013). Antinociceptive activity of fruits extracts and "arrope" of *Geoffroea decorticans* (chañar). *Journal of ethnopharmacology*, 145(1), 355-362.

- Sandoval, V. P., Jaca, C. y Ormazabal, M. (2017). *Economía circular. Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (15), 85-95.
- Sarma, G., Bakshi, G., Mehta, S., Oommen, S. J. y Subnani, T. (2014). Suitability of certain non-dairy food substances processed by lactic acid fermentation for applications as probiotics. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 4(1), 1563-1570.
- Thilakarathna, W. W., Langille, M. G., & Rupasinghe, H. V. (2018). Polyphenol-based prebiotics and synbiotics: potential for cancer chemoprevention. *Current Opinion in Food Science*, 20, 51-57.
- Trejo-Márquez, M., Lira-Vargas, A. y Pascual-Bustamante, S. (2017). Fibra para el futuro: propiedades y beneficios. En: *Propiedades funcionales de hoy*, (M.E. Ramírez-Ortiz, ed.), Pp. 1-34, OmniaScience, México.
- Turkmen, N., Sari, F. y Velioglu, Y. S. (2006). Effects of extraction solvents on concentration and antioxidant activity of black and black mate tea polyphenols determined by ferrous tartrate and Folin–Ciocalteu methods. *Food chemistry*, 99(4), 835-841.
- Xing X, Hsieh YSY, Yap K, Ang ME, Lahnstein J, Tucker MR, Burton RA, Bulone V. (2017). Isolation and structural elucidation by 2D NMR of planteose, a major oligosaccharide in the mucilage of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Carbohydr Polym.* 1, 175:231-240.
- Zhou, F., Jiang, X., Wang, T., Zhang, B., & Zhao, H. (2018). *Lyciumbarbarum* polysaccharide (LBP): a novel prebiotics candidate for *Bifidobacterium* and *Lactobacillus*. *Frontiers in microbiology*, 9, 1034.





## Betalaínas, colorantes y compuestos antioxidantes naturales con potencial aplicación en la industria alimentaria: un enfoque de economía circular

Calva-Estrada, Sergio de Jesús<sup>1</sup>  
Jiménez-Fernández, Maribel<sup>2</sup>  
Lugo-Cervantes, Eugenia<sup>1\*</sup>

<sup>(1)</sup> Unidad de Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ) A.C., Camino Arenero 1227, El Bajío, Zapopan, Jalisco, México. C.P. 45019.

<sup>(2)</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana, Av. Doctor Luis Castelazo, Industrial Las Animas, Xalapa Enríquez, Veracruz, México. C.P. 91190.

\* Correspondencia  
ELC (orcid.org/0000-0003-3337-5872),  
elugo@ciatej.mx; Tel. 3345 5200, ext. 2218.

El aumento en la demanda de colorantes de origen natural con potencial aplicación en la industria alimentaria, ha conllevado a la búsqueda y desarrollo de estrategias que hagan frente a los desafíos de la economía circular sostenible. Las betalaínas, son un grupo de compuestos nitrogenados naturales con propiedades colorantes, antioxidantes, entre otras. México, es productor y generador de diversas fuentes vegetales potenciales para la obtención de estos pigmentos, tales como; el amaranto de la familia *Amaranthaceae*, *Hylocereus*, *Stenocereus*, *Opuntia*, *Escontria* de la familia *Cactaceae* y tubérculos del betabel (*Beta vulgaris* L.). Sin embargo, su aplicación ha sido limitada debido a su inestabilidad a la luz, oxígeno y pH, así como a ciertas condiciones de extracción, almacenamiento y naturaleza de la matriz alimentaria en la que es incorporada. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación es recopilar información relevante y actualizada sobre las propiedades estructurales de las betalaínas y sus fuentes potenciales de obtención a manera de ofrecer un panorama encaminado al desarrollo de futuras y exitosas estrategias de extracción y aplicación como aditivos naturales en alimentos de forma sustentable bajo el contexto de una bioeconomía circular. El conjunto de estudios aquí presentados demuestran que la participación de las betalaínas como aditivo alimentario y en el desarrollo de materiales inteligentes y/o activos para el envasado de alimentos, posee un potencial sustancial para el desarrollo económico, extender la vida de anaquel de productos, aumentar la seguridad alimentaria y reducir el impacto ambiental negativo de desechos alimentarios.

**Palabras clave:** antioxidantes; betacianinas; betaxantinas; bioeconomía; colorantes; encapsulación.



## Introducción

La demanda de aditivos alimentarios de origen natural, con propiedades colorantes y antioxidantes, ha incrementado en los últimos años en la industria alimentaria, ofreciendo al consumidor productos de mayor aporte nutricional y mejores atributos sensoriales, procurando garantizar la seguridad alimentaria (Kanatt, 2020; Zin *et al.*, 2020a), y aprovechando los recursos naturales en la mayor medida a través de plan de acción de economía circular orientado a reducir, reutilizar y reciclar (Barna *et al.*, 2020). En el cual, el subproducto de un proceso se convierte en el insumo de uno nuevo en donde adquiere un nuevo valor.

Con ello, se alarga el ciclo de vida de un recurso, se mantiene estable la economía y se reduce al mínimo la generación de residuos (Ancín-Azpilicueta *et al.*, 2020; Benito-Román *et al.*, 2020). Las betalaínas, constituyen un grupo de pigmentos naturales con propiedades antioxidantes, antimicrobianas y otras más asociadas con múltiples beneficios para la salud humana (Prieto-Santiago *et al.*, 2020; Zin *et al.*, 2020b). Sin embargo, su aplicación en productos industrializados implica grandes desafíos para el desarrollo de un procesamiento viable, rentable, sostenible y que garantice su estabilidad (Castro-Enríquez *et al.*, 2020). Por lo anterior, el presente capítulo se enfoca en una recopilación de los estudios más relevantes y actualizados que permiten comprender las propiedades químicas de las betalaínas y los factores asociados a su estabilidad. Un análisis de sus fuentes naturales potenciales para la implementación de un proceso de obtención basado en bioeconomía circular. Así como una descripción de las oportunidades de aplicación de las betalaínas en el campo de la industria alimentaria para la mejora de la aceptabilidad y vida de anaquel de productos, abordando el efecto de la matriz en la que se incorpora.

## 1. Principios de la bioeconomía circular y sostenible

La economía de los países desarrollados y/o en desarrollo, actualmente enfrenta importantes problemas de sostenibilidad (Mahjoub y Domscheit, 2020). La globalización del planeta, el crecimiento poblacional y su consecuente necesidad de producir alimentos en grandes cantidades, los beneficios económicos individuales y su priorización sobre la salud ambiental, entre otros, han generado una tendencia de desarrollo de modelos para una agricultura moderna con sistemas de producción lineal, en donde los artículos se producen, se consumen y luego se desechan, generando una situación en la que los recursos cada vez son más limitados y la producción exponencial de residuos y su acumulación ilimitada representa un impacto ambiental preocupante. Ante esto, surge un concepto de economía circular centrado en crear ciclos completos aplicables a un sistema de economía funcional basada en las 6R: Reducir, Reutilizar, Reciclar, Rediseñar, Remanufacturar y Recuperar (Winans *et al.*, 2017). Con esta perspectiva, la economía circular busca la reducción de entradas de materias primas en el sistema productivo, reutilizar, reciclar o recuperar los residuos producidos por las diferentes industrias, rediseñar y actualizar tecnologías para el desarrollo de productos rentables que afronte el uso consciente y racional de los recursos naturales, y que asegure el crecimiento económico al mismo tiempo que promueva la equidad social y la conservación del medio ambiente. Sin embargo, a pesar de todas las ventajas de aplicar la economía circular a la agricultura, actualmente no es una práctica tan común como debería ser (Jimenez-Lopez *et al.*, 2020).

El concepto de la economía circular es complementario a los principios de la bioeconomía basada en la transformación de la biomasa agrícola/forestal y de residuos orgánicos en una amplia gama de productos de alto valor agregado (nutricional y comercial) de base biológica, como colorantes, bioactivos, biopolímeros, etc. De esta manera, los desechos industriales representan fuentes de recuperación de recursos sustanciales para el crecimiento de la economía de un país (Costa *et al.*, 2017; Mahjoub y Domscheit, 2020; Rajesh-Banu *et al.*, 2020).

### 1.1 Bioeconomía circular de residuos de alimentos en la producción de colorantes alimentarios

En la industria de los alimentos mínimamente procesados, el procesamiento de frutas y verduras produce cantidades significativas de subproductos, de aproximadamente el 50 % de la masa inicial total, constituidos de tejidos no comestibles, como cáscaras, hojas y semillas, que son separados de la pulpa como desechos, lo que provoca pérdidas económicas y nutricionales, así como un impacto negativo ambiental (Costa *et al.*, 2017; Dos Santos *et al.*, 2016; Nutter *et al.*, 2020). Sin embargo, estos subproductos de desecho contienen numerosos compuestos bioactivos, como colorantes naturales, de gran interés industrial (Das *et al.*, 2020; Yücepepe *et al.*, 2020). Impulsado por la demanda mundial de los consumidores de productos naturales y saludables, el mercado mundial de colorantes alimentarios naturales está creciendo a un ritmo acelerado. Para el año 2017, el mercado global de los colorantes alimentarios fue valorado en \$3.51 billones de dólares, y la utilización de subproductos agroindustriales es una posibilidad plausible para su obtención (Ciriminna *et al.*, 2019; Dos Santos *et al.*, 2016). Los colorantes naturales están siendo formulados para su aplicación en una variedad de alimentos y bebidas, de estabilidad mejorada, no tóxicos, nutritivos y de altas propiedades colorantes capaces de crear efectos suaves y sutiles en los productos al que se incorporan (Costa *et al.*, 2017; Kushwaha *et al.*, 2018). Bajo este contexto, las betalaínas constituyen unos de los compuestos candidatos más auspiciosos, ofreciendo además beneficios potenciales para la salud, lo que los hace de interés para la fortificación y suplementación de alimentos (Ciriminna *et al.*, 2019; Zin *et al.*, 2020b).

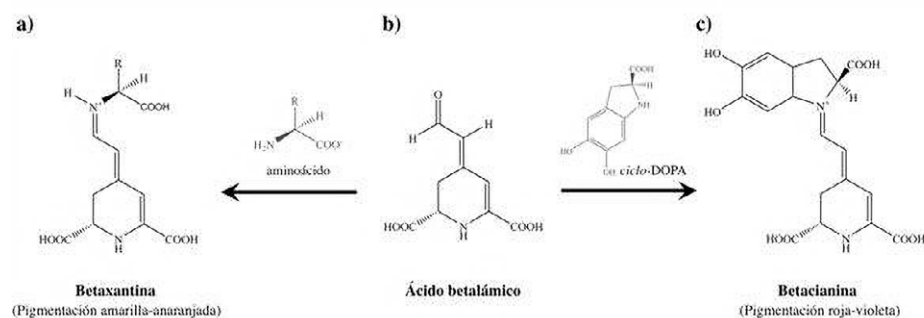
## 2. Betalaínas en la re-valorización de residuos de alimentos

### 2.1 Generalidades de las betalaínas

Las betalaínas son pigmentos nitrogenados derivados del ácido betalámico (ácido 4-(2-oxoetilideno)-1,2,3,4-tetrahidropiridin-2,6-dicarboxílico) (FIGURA 1B) (Slimen *et al.*, 2017). Son altamente hidrofílicas debido a su gran capacidad de formación de enlaces por puentes de hidrógeno, asociada a sus múltiples grupos hidroxilo (-OH) (Fathordoobady *et al.*, 2016). La estructura básica de las betalaínas: el ácido betalámico, se condensa con diferentes moléculas dando como origen dos clasificaciones estructurales. La primera clasificación que consta de betacianinas, está constituida por estructuras en las que el ácido betalámico está condensado con *ciclo*-DOPA (*ciclo*-L-3,4-dihidroxifenilalanina), o sus derivados glucosílicos (FIGURA 1C). Mientras que la segunda clasificación corresponde a las betaxantinas (FIGURA 1A), originadas a partir de la condensación del ácido betalámico con aminoácidos, aminas o compuestos derivados (Silva *et al.*, 2020; Zin *et al.*, 2020b). Cada clasificación estructural posee un sistema de dobles enlaces conjugados distinto que conlleva a un cambio en la resonancia de sus electrones. Este sistema actúa como cromóforo con absorción de luz en la región visible, de 457–485 nm, generando una coloración amarilla-anaranjada característica de

las betaxantinas. Mientras que las betacianinas, debido a que su sistema de resonancia electrónica es más extendido, produce un cambio bathocrómico de 50 a 70 nm, generando que su absorción cercana a 532-550 nm produciendo una coloración rojo-violeta (Choo, 2019; Rodríguez-Amaya, 2019).

Figura 1. a) Estructura general de las betaxantinas



Estructura general de las betaxantinas derivadas de la condensación del ácido betalámico con aminoácidos o sus derivados; b) ácido betalámico, la estructura básica de las betalainas; y c) estructura general de las betacianinas derivadas de la condensación del ácido betalámico con ciclo-DOPA (Modificada de Slimen et al., 2017).

## 2.2 Fuentes botánicas para la obtención de betalainas

Las betalainas son metabolitos secundarios presentes principalmente en semillas, frutos, flores, hojas, tallos y raíces de las familias *Amaranthaceae*, *Cactaceae* y *Chenopodiaceae* a las que confiere su coloración característica, roja-amarilla (Gengatharan *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2020; Otálora *et al.*, 2019). La TABLA 1 proporciona un resumen de las principales fuentes botánicas con hallazgos relacionados al contenido de este grupo de colorantes. La raíz del betabel (*Beta vulgaris* L.) es una verdura tropical perteneciente a la familia *Amaranthaceae* que se cultivan en diversas partes del mundo (incluidos EUA, Rusia, Alemania, Polonia y Francia) para el consumo de sus raíces y para el aprovechamiento su alto contenido betalámico (Ciriminna *et al.*, 2018; Das *et al.*, 2020; Rodríguez *et al.*, 2016; Zin *et al.*, 2020 c). De hecho, el betabel representa el único cultivo explotado comercialmente para este fin por su alto contenido en betalainas que oscila de entre los 309–4,450 mg de betacianinas/kg, y 163–2,420 mg de betaxantinas/kg (Rodríguez *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2020; Swamy *et al.*, 2014). Sin embargo, para que la raíz del betabel alcance estas características, es necesario un tiempo de por lo menos dos años a partir de su cultivo (Ciriminna *et al.*, 2018). Ante esto, se han estudiado otras fuentes botánicas alternativas a la práctica industrial actual para extraer este colorante natural y de mayores concentraciones a las reportadas en la raíz del betabel, entre las que se pueden mencionar los frutos de cactáceas de los géneros *Opuntia*, *Hylocereus*, *Stenocereus* y *Escontria* (Rodríguez *et al.*, 2016).

Tabla 1. Fuentes botánicas estudiadas como fuentes potenciales de betalaínas para uso industrial, método de extracción empleado y su concentración reportada

| Fuente botánica                                    | Método de extracción                       | Betalainas<br>totales<br>(mg/kg) | Betacianina<br>(mg/kg) | Betanina<br>(mg/kg) | Amarantina<br>(mg/kg) | Betaxantina<br>(mg/kg) | Referencia                              |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------------|
| Flores/Brácteas                                    |                                            |                                  |                        |                     |                       |                        |                                         |
| Amaranto<br>( <i>Amaranthus spp.</i> )             | Extracción sólido-líquido                  | 9.5–60.2                         | –                      | –                   | 4.5–27.6              | –                      | Li <i>et al.</i> , 2015                 |
| Buganvilla<br>( <i>Bougainvillea spectabilis</i> ) | Extracción sólido-líquido                  | –                                | 4,650                  | –                   | –                     | 1,160                  | Orozco-Villafuerte <i>et al.</i> , 2019 |
| Frutos                                             |                                            |                                  |                        |                     |                       |                        |                                         |
| Espinaca de Malabar<br>( <i>Basella rubra L.</i> ) | Maceración                                 | 138.1                            | –                      | –                   | –                     | –                      | Kumar <i>et al.</i> , 2020              |
|                                                    | Extracción sólido-líquido                  | 1,437.60                         | 1,241.80               | –                   | –                     | 191.6                  | Kumar <i>et al.</i> , 2015              |
|                                                    | Extracción asistida con ultrasonido        | –                                | 1,420                  | –                   | –                     | 5,350                  | Maran & Priya, 2015                     |
| Jiotilla ( <i>Escontria chiotilla</i> )            | Extracción sólido-líquido                  | 10,292                           | 4,640                  | –                   | –                     | 5,651                  | Soto-Castro <i>et al.</i> , 2019        |
| Tuna ( <i>Optunia ficus indica</i> )               | Extracción sólido-líquido                  | 415.4                            | –                      | –                   | –                     | –                      | Prakash-Maran <i>et al.</i> , 2013      |
| Tuna ( <i>Opuntia spp.</i> )                       | Extracción con CO <sub>2</sub> presurizado | 890                              | –                      | –                   | –                     | –                      | Nunes <i>et al.</i> , 2015              |
|                                                    | Extracción asistida con pulsos eléctricos  | 2,850 – 22,520                   | 1,590 – 16,550         | –                   | –                     | 1,260 – 6,860          | Jiménez-Alvarado <i>et al.</i> , 2015   |
| Pitaya ( <i>Hylocereus polyrhizus</i> )            | Extracción sólido-líquido                  | –                                | 827.9                  | –                   | –                     | –                      | Ramli <i>et al.</i> , 2014              |
|                                                    | Extracción asistida con ultrasonido        | –                                | 713.4                  | –                   | –                     | –                      | Ramli <i>et al.</i> , 2014              |
| Pitaya ( <i>Stenocereus queretaroensis</i> )       | Extracción sólido-líquido                  | 8,334                            | 3,541                  | –                   | –                     | 4,793                  | Soto-Castro <i>et al.</i> , 2019        |
| Pitaya ( <i>Stenocereus stellatus</i> )            | Extracción asistida con ultrasonido        | 4,803                            | –                      | –                   | –                     | –                      | Pérez-Loredo <i>et al.</i> , 2017       |
| Xoconostle ( <i>Opuntia joconostle</i> )           | Extracción sólido-líquido                  | –                                | 920                    | –                   | –                     | –                      | Sanchez-Gonzalez <i>et al.</i> , 2013   |

| Germinados                                 |                                     |             |        |              |           |        |                              |
|--------------------------------------------|-------------------------------------|-------------|--------|--------------|-----------|--------|------------------------------|
| Amaranto<br>( <i>Amaranthus spp.</i> )     | Extracción sólido-líquido           | 26.9        | –      | –            | 12.8      | –      | Li <i>et al.</i> , 2015      |
| Hojas                                      |                                     |             |        |              |           |        |                              |
| Amaranto<br>( <i>Amaranthus spp.</i> )     | Extracción sólido-líquido           | 169.0–209.3 | –      | –            | 77.5–96.7 | –      | Li <i>et al.</i> , 2015      |
| Amaranto<br>( <i>Amaranthus cruentus</i> ) | Extracción sólido-líquido           | –           | 1590.9 | –            | –         | –      | Das <i>et al.</i> , 2019     |
| Partes aéreas                              |                                     |             |        |              |           |        |                              |
| Salicornia fruticosa                       | Extracción sólido-líquido           | 129,900     | –      | –            | –         | –      | Mohamed <i>et al.</i> , 2018 |
| Planta completa                            |                                     |             |        |              |           |        |                              |
| Alternanthera sessilis                     | Extracción sólido-líquido           | –           | –      | 73,100       | 72,700    | 74,500 | Yap <i>et al.</i> , 2019     |
| Raíces                                     |                                     |             |        |              |           |        |                              |
| Betabel<br>( <i>Beta vulgaris L.</i> )     | Extracción asistida con ultrasonido | –           | –      | 37.5 – 756.4 | –         | –      | Wang <i>et al.</i> , 2020    |
|                                            | Extracción sólido-líquido           | –           | 3,900  | –            | –         | 2,140  | Silva <i>et al.</i> , 2020   |
|                                            | Extracción sólido-líquido           | –           |        | 1560         | –         | –      | Neagu & Barbu, 2014          |
|                                            | Extracción sólido-líquido           | –           | 309    | –            | –         | 163    | Swamy <i>et al.</i> , 2014   |
|                                            | Extracción asistida con ultrasonido | –           | 4450   | –            | –         | 2420   | Silva <i>et al.</i> , 2020   |
| Semillas/Granos                            |                                     |             |        |              |           |        |                              |
| Amaranto<br>( <i>Amaranthus spp.</i> )     | Extracción sólido-líquido           | 7–9.6       | –      | –            | 0.4–4.4   | –      | Li <i>et al.</i> , 2015      |
| Tallos                                     |                                     |             |        |              |           |        |                              |
| Amaranto<br>( <i>Amaranthus spp.</i> )     | Extracción sólido-líquido           | 5.6–15.4    | –      | –            | 2.8–7.0   | –      | Li <i>et al.</i> , 2015      |

Las plantas del género *Opuntia spp.* son pertenecientes a la familia *Cactaceae* y cuyos frutos, conocidos como “tunas”(caracterizadas por su jugoso sabor dulce) o como “xoconostle”(frutos de sabor agrio de la especie *Opuntia joconostle*), son de gran interés comercial en México y países del sur de América y Europa, en donde son consumidos en fresco por el ser humano, utilizados como alimento para animales de granja o para su uso en la medicina popular (Sanchez-Gonzalez *et al.*, 2013; Scarano *et al.*, 2020). Las tunas son una rica fuente de betalaínas, particularmente del tipo betacianina, de concentraciones reportadas de entre 2,850–22,520 mg/kg (Jiménez-Alvarado *et al.*, 2015). A diferencia de la raíz del betabel, que genera su contenido de betalaínas años después de su cultivo y que su utilización incluye desventajas como el arrastre de microorganismos del suelo, altos



niveles de nitrato y un sabor terroso provocado por sus geosminas y derivados de pirazinas, los frutos de *Opuntia* son producidos varias veces al año, y su producción aérea no implica problemas de contaminación y contribución negativa al sabor (Ciriminna *et al.*, 2018, 2019; Rodríguez *et al.*, 2016). Otras cactáceas originarias de México, Centroamérica y Sudamérica pertenecientes los géneros *Hylocereus* y *Stenocereus*, incluyen especies productoras de frutos jugosos y dulces conocidos como “pitahayas” o “pitayas” de gran valor en el mercado internacional por sus características sensoriales (sabor y apariencia), además de sus propiedades benéficas para la salud, principalmente relacionadas a su alto contenido de betalaínas de hasta 4,793 mg/kg (Pérez-Loredo *et al.*, 2017; Ramli *et al.*, 2014; Rodríguez *et al.*, 2016; Thirugnanasambandham y Sivakumar, 2015; Utpott *et al.*, 2020). Los frutos de otras cactáceas producidas en México, tales como *Escontria chiotilla* y *Stenocereus queretaroensis* también han sido recientemente estudiadas como fuentes potenciales de betalaínas presentando contenidos equivalentes al 30 y 87 % respectivamente, del contenido de betalaínas en pulpa (Soto-Castro *et al.*, 2019). La espinaca de Malabar (*Basella rubra* L.), una hortaliza enredadera suculenta perteneciente a la familia *Basellaceae* y originaria de áreas tropicales y subtropicales como la India, es popularmente consumida por sus hojas como verdura, una excelente fuente de calcio, hierro, así como de otros nutrientes y nutraceuticos. La planta de *B. rubra* produce frutos carnosos de color rojo-violeta de alto contenido de betalaínas, el cual oscila de entre 138.1–1,438 mg/kg, que son comunmente utilizados en la medicina tradicional por sus múltiples propiedades curativas. Una planta de espinaca de tres a cuatro meses puede producir aproximadamente 2 kg de frutas frescas, lo que los hace una buena fuente de betalaínas de gran potencial funcional (Kumar *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2020; Maran y Priya, 2015). Las flores del género *Amaranthus spp.* (Li *et al.*, 2015) y las brácteas *Bougainvillea spp.* (Orozco-Villafuerte *et al.*, 2019) también constituyen una fuente alternativa de estos colorantes naturales, presentando esta última un contenido de betacianinas de 4,650 mg/kg y de betaxantinas de 1,160 mg/kg. Li *et al.*, (2015) observaron que las hojas de la especie *Amaranthus hypochondriacus* presentaban un mayor contenido de betalaínas en comparación con otras de sus especies y partes de la misma planta, incluyendo su semilla, flor, tallo y fruto. Los hallazgos son relevantes para poder considerar partes de la planta de rápido desarrollo como sus partes aéreas, incluidas hojas, como fuente natural económica, sustentable y renovable para la obtención de este grupo de colorantes con proyecciones de aplicación industrial. En este sentido, las partes aéreas de la planta *Salicornia fruticosa*, cultivada en regiones de Egipto, han sido reportadas también como una muy interesante alternativa de obtención de estos pigmentos, reportándose concentraciones de extracción de hasta 129,900 mg de betalaínas/kg (Mohamed *et al.*, 2018).

### **2.2.1 Residuos alimentarios potenciales para la obtención de betalaínas**

tención de extractos ricos en estos compuestos bioactivos de interés industrial. La obtención de colorantes naturales a partir de residuos de material vegetal es una forma de reducir la contaminación ambiental y generar nuevos productos de valor agregado más saludables a bajo costo (Maran y Priya, 2016). Algunos de los residuos vegetales estudiados como fuente potencial de betalaínas se enlistan en la *TABLA 2*.

Uno de los primeros pasos a la implementación del plan de bioeconomía circular, implica la valorización de residuos vegetales para la ob-

Tabla 2. Fuentes de residuos vegetales-alimentarios reportados como fuentes potenciales de betalaínas para uso industrial, método de extracción empleado y concentración

| Residuo vegetal                                               | Método de extracción                | Betalainas totales<br>(mg/kg) | Betacianina<br>(mg/kg) | Betanina<br>(mg/kg) | Amarantina<br>(mg/kg) | Betaxantina<br>(mg/kg) | Referencia                       |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|
| Cáscara de frutos                                             |                                     |                               |                        |                     |                       |                        |                                  |
| Jiotilla ( <i>Escontria chiotilla</i> )                       | Extracción sólido-líquido           | 3,024                         | 1,252                  | –                   | –                     | 1,772                  | Soto-Castro <i>et al.</i> , 2019 |
| Tuna ( <i>Opuntia engelmannii</i> )                           | Extracción asistida con ultrasonido | 201,600                       | –                      | –                   | –                     | –                      | Melgar <i>et al.</i> , 2019      |
|                                                               | Extracción asistida con microondas  | 132,900                       | –                      | –                   | –                     | –                      | Melgar <i>et al.</i> , 2019      |
| Pitaya ( <i>Hylocereus polyrhizus</i> )                       | Extracción sólido-líquido           | –                             | 186.7                  | –                   | –                     | –                      | Ramli <i>et al.</i> , 2014       |
|                                                               | Extracción asistida con ultrasonido | –                             | 176.4                  | –                   | –                     | –                      | Ramli <i>et al.</i> , 2014       |
| Pitaya ( <i>Stenocereus queretaroensis</i> )                  | Extracción sólido-líquido           | 6,042                         | 2,786                  | –                   | –                     | 3,261                  | Soto-Castro <i>et al.</i> , 2019 |
| Cáscara de raíces                                             |                                     |                               |                        |                     |                       |                        |                                  |
| Betabel ( <i>Beta vulgaris</i> L.)                            | Extracción sólido-líquido           | –                             | ≈ 256                  | –                   | –                     | ≈ 226                  | Kushwaha <i>et al.</i> , 2018    |
| Rábano negro ( <i>Raphanus sativus</i> L. var. <i>niger</i> ) | Extracción sólido-líquido           | –                             | 77                     | –                   | –                     | 225                    | Yücepepe <i>et al.</i> , 2020    |
| Cáscara de semillas/granos                                    |                                     |                               |                        |                     |                       |                        |                                  |
| Quinoa ( <i>Chenopodium quinoa</i> Willd)                     | Extracción asistida con ultrasonido | –                             | 964.7                  | –                   | –                     | 2010.1                 | Laqui-Vilca <i>et al.</i> , 2018 |
| Harinas de fragmentos vegetales residuales                    |                                     |                               |                        |                     |                       |                        |                                  |
| Betabel ( <i>Beta vulgaris</i> L.)                            | Extracción sólido-líquido           | 81,310                        | –                      | –                   | –                     | –                      | Costa <i>et al.</i> , 2017       |
| Hojas                                                         |                                     |                               |                        |                     |                       |                        |                                  |
| Betabel ( <i>Beta vulgaris</i> L.)                            | Extracción asistida con ultrasonido | –                             | 562.2                  | –                   | –                     | 949.1                  | Nutter <i>et al.</i> , 2020      |
| Tallos                                                        |                                     |                               |                        |                     |                       |                        |                                  |
| Betabel ( <i>Beta vulgaris</i> L.)                            | Extracción asistida con ultrasonido | –                             | 1,290                  | –                   | –                     | 5,320                  | Maran & Priya, 2016              |

El orujo y cáscara de la raíz del betabel constituyen unos de los principales desecho del proceso de extracción del jugo de betabel. Al igual que la raíz de betabel entera, su orujo y cáscara, constituyen una fuente poderosa para la extracción de betalaínas, además de micronutrientes, proteínas, vitaminas, minerales, potasio y otros fitoquímicos bioactivos de potencial uso para el desarrollo de alimentos funcionales (Das *et al.*, 2020; Kushwaha *et al.*, 2018). En comparación con la pulpa, la concentración de betalaínas en la cáscara del betabel varía entre un 40 y un 70 % más dependiendo su genotipo (Zin *et al.*, 2020b). Las hojas y tallos del betabel también son fragmentos de planta comúnmente subutilizados, siendo destinados a la alimentación animal, como fertilizantes orgánicos o bien descartados como desperdicio, a pesar de su valor inherente. Las hojas y tallos del betabel representan aproximadamente el 50 % de toda la planta y constituyen una fuente importante de compuestos funcionales (incluidos betalaínas, polifenoles, ácidos grasos poliinsaturados, hierro, sodio, potasio, vitamina A y vitaminas del complejo B, incluso en niveles significativamente superiores a los de las raíces), lo que significa que la mitad de su biomasa se pierde después de la cosecha, así como el desperdicio de múltiples recursos invertidos en su producción. De manera que estos residuos agroindustriales podrían ser utilizados como fuente de componentes valiosos que aportarían un valor a la cadena de su procesamiento a través del mejoramiento de su gestión (Battistella-Lasta *et al.*, 2019; Dos Santos *et al.*, 2016; Maran y Priya, 2016; Nutter *et al.*, 2020). A partir de las cáscaras, peladuras y tallos del betabel, se puede obtener una harina residual, un producto con alto contenido de fibra y betalaínas de gran aplicabilidad, funcionalidad y un alto potencial de mercado como ingrediente alimentario (Costa *et al.*, 2017).

Las cáscaras de la tuna (*Opuntia spp.*) y de pitaya (*Hylocereus spp.*) son materiales de desecho del consumo de la fruta. La producción de residuos de la cáscara de *Opuntia* es significativa, con una duración de varios meses, y la mayor parte de la cáscara termina en vertederos o se utiliza como alimento para animales o en compostaje. Al no ser comestible, la cáscara es eliminada de la fruta por todas las empresas comercializadoras de la fruta fresca, envasadas, de mermeladas y jugos (Ciriminna *et al.*, 2019). Sin embargo, las cáscaras de la tuna colorada representan una fuente muy rica en betalaínas, con contenidos de hasta 201,600 mg/kg, así como de quercetina y luteolina (Melgar *et al.*, 2019; Scarano *et al.*, 2020). Por su parte, el cultivo de la pitaya es de aproximadamente 150 toneladas por año, lo que implica una gran cantidad de residuos sólidos en forma de cáscaras generados por las industrias de procesamiento de esta fruta lo que representa también un problema ambiental de nivel mundial (Rodríguez *et al.*, 2016). La cáscara de la tuna y de pitaya representan una fuente con cantidades sustanciales de betalaínas y presentan las mismas propiedades funcionales que las que se encuentran en la porción comestible (Ciriminna *et al.*, 2019; Ramli *et al.*, 2014; Soto-Castro *et al.*, 2019; Thirugnanasambandham y Sivakumar, 2015).

La quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*), un pseudocereal de la región andina de América del Sur reconocido como un grano extremadamente nutritivo a nivel mundial, es una buena fuente de fitoquímicos y betalaínas localizadas en las cáscaras del grano, un subproducto con cantidades significativas de amarantina (121.9–148.6 mg/kg), isoamarantina (108.3–145.5 mg/kg) y dopaxantina (35.9–85.3 mg/kg), representando así un ingrediente funcional potencial único para la industria alimentaria y/o farmacéutica (Laqui-Vilca *et al.*, 2018). Finalmente, la cáscara de la raíz del rábano negro (*Raphanus sativus L. var. niger*), una planta perteneciente a la familia *Brassicaceae* que generalmente se consume como alimento y emplea como parte de la medicina tradicional, constituye un residuo no comestible de desecho de composición rica en betaxantinas (225 mg/kg) y betacianinas (77 mg/kg), además de otros compuestos de interés industrial como el ácido ferúlico y epicatequina (Yücepepe *et al.*, 2020). En conjunto, estos estudios muestran respuestas valiosas con respecto a

la recuperación de compuestos bioactivos de uso potencial como aditivos alimentarios y/o nutracéuticos a partir de fuentes de desechos cuyo aprovechamiento contribuye a la minimización de pérdidas económicas, y aumentaría la utilización de la biomasa para la recuperación de compuestos funcionales, mejorando su eficiencia y aumentando la sostenibilidad de los sistemas de producción y la cadena agroalimentaria (Battistella-Lasta *et al.*, 2019; Nutter *et al.*, 2020).

## 2.3 Oportunidades potenciales de la betalaínas en la industria alimentaria

Numerosos estudios han evaluado el potencial de las betalaínas como aditivo colorante y antioxidante en diferentes productos, tales como gelatinas y sorbetes (Attia *et al.* 2013), helados (Kumar *et al.*, 2015; Roriz *et al.*, 2018), bebidas (Gengatharan *et al.*, 2016; Güneşer, 2016; Kumar *et al.*, 2015, 2020; Rodríguez-Sánchez *et al.*, 2017), cremas unttables de frutos (Kumar *et al.*, 2015, 2020), gomitas de gelatina (Rodríguez-Sánchez *et al.* 2017), aceites vegetales (Attia *et al.* 2013), productos lácteos (Coria-Cayupán y Nazareno, 2015) y carnes (Da Silva *et al.*, 2019).

### 2.3.1 Betalaínas como colorantes alimentarios

La adición de estos pigmentos en los alimentos ha demostrado que puede mejorar la aceptabilidad del producto frente al consumidor, pero esto depende de la concentración de pigmento utilizada (Attia *et al.* 2013). La aplicación de las betalaínas como colorante ha mostrado estabilidad en las condiciones adecuadas de almacenamiento del producto. En helados almacenados a -20°C han mostrado estabilidad de hasta 180 días (Kumar *et al.*, 2015; Roriz *et al.*, 2018). En cremas de frutos unttables, estos pigmentos pueden mantener el 95 % de estabilidad hasta un año después de almacenamiento a 5°C (Kumar *et al.* 2020) y no más de 7 días cuando eran adicionadas en leche almacenadas a 4°C (Gengatharan *et al.*, 2016). Se observó que la mayor estabilidad de las betalaínas se logra cuando productos, como bebidas y gomitas de gelatina, son almacenados a bajas temperaturas y en condiciones de oscuridad (Rodríguez-Sánchez *et al.*, 2017). Y en bebidas, su estabilidad no ha superado los tres meses de almacenamiento a 5°C con pérdidas inferiores al 50 % (Kumar *et al.*, 2020).

### 2.3.2 Betalaínas como antioxidantes

En su aplicación como antioxidantes la betalaínas en aceite de maíz han disminuido el índice de peróxido con valores similares a los obtenidos con Butilhidroxitolueno (BHT) después de siete días de almacenamiento a 60°C (Attia *et al.*, 2013). Han demostrado una disminución del daño oxidativo superior al 80 % en yogur y 50 % en nata (Coria-Cayupán y Nazareno, 2015). Y han contribuido a la inhibición de la oxidación lipídica en carne de cerdo con resultados similares a los obtenidos al agregar antioxidantes sintéticos como Butilhidroxianisol (BHA) y BHT después de 6 días de almacenamiento a 4°C (Da Silva *et al.*, 2019). Resulta interesante que en muchos de los casos, los productos estudiados han mostrado también buena estabilidad microbiológica, demostrando que su aplicación como aditivo alimentario puede cubrir 3 propiedades: colorante, antioxidante y antimicrobiana (Kumar *et al.* 2020).

### 2.3.3 Betalaínas para la activación y desarrollo de materiales para el empaque de alimentos

Actualmente existe un creciente interés en el desarrollo de materiales de empaques funcionales (empaques activos) que tengan la capacidad de prevenir la oxidación de los alimentos y/o el

crecimiento microbiano durante su almacenamiento (Oliveira *et al.* 2020). Dentro de las nuevas tendencias en la aplicación de betalaínas estudiadas para la industria alimentaria se encuentra su incorporación en el desarrollo de estos nuevos materiales activos y/o inteligentes, aprovechando la sensibilidad de estos pigmentos a los cambios de pH. Otra oportunidad de economía circular en el que converge el aprovechamiento de biopolímeros renovables, algunos de ellos obtenidos a partir de desechos agroindustriales, para el desarrollo de películas biodegradables de uso potencial para empaque y su activación con agentes naturales (colorantes y antioxidantes) obtenidos también a partir de fuentes naturales renovables (Nogueira *et al.*, 2020). Jamróz *et al.*, (2019) observaron que al incorporar un extracto rico en betalaínas en películas de furcelarano, éstas tenían la capacidad de cambiar de rojo a verde cuando eran expuestas a ambientes con amoníaco. La película se aplicó como empaque para monitorear el deterioro de los filetes de pescado almacenados a 2°C; sin embargo, el cambio de color de la película no fue lo suficientemente efectivo para informar a los panelistas capacitados sobre el deterioro del producto. Hu *et al.*, (2020), Qin *et al.*, (2020) y Yao *et al.*, (2020) estudiaron también la adición de betalaínas en películas a base de polímeros naturales, obteniendo películas funcionales con propiedades antioxidantes, antimicrobianas y sensibles al amoníaco de gran potencial para ser empleadas como materiales de empaque inteligente aplicables al monitoreo de la frescura de camarón. Esto indica que algunas fuentes de betalaínas pueden ser de gran interés en la industria alimentaria, no solo como aditivo con propiedades colorantes, antioxidantes y antimicrobianas, sino que también se proyecta su aplicación significativa para la innovación y desarrollo de materiales inteligentes para el envasado de productos de la industria pesquera.

### 3. Conclusiones

Las crecientes cantidades de residuos alimentarios han propiciado un nuevo enfoque industrial que prevé la transformación de estos en nuevos productos bioactivos siguiendo las nuevas tendencias y demandas del mercado como un paso importante para la innovación del sistema de producción dentro de la cadena agroalimentaria para la generación de productos de valor agregado, comprendiendo una estrategia sustentable, rentable y respetuosa con el medio ambiente al atender el problema de la gestión de residuos con una orientación en economía circular. Así el estudio de nuevas fuentes naturales o residuales alternativas para las obtención de betalaínas en mayor abundancia, con una mayor velocidad de crecimiento e inclusive con mejores características de estabilidad, puede favorecer la reducción de costos del proceso, y hacerlo de mayor sustentabilidad y rentabilidad, lo que podría convertirse en una práctica común para aquellos países con actividades agrícolas importantes involucradas en el contexto. El uso de las betalaínas en el desarrollo de materiales inteligentes y/o activos para el envasado de alimentos, constituye otra alternativa prometedora de aplicación, marcando la pauta para la investigación y aprovechamiento de las propiedades de las betalaínas en otros campos de la industria de los alimentos en la búsqueda de extender la vida de anaquel, aumentar la seguridad alimentaria y reducir el impacto ambiental negativo de sus desechos.



## 4. Referencias

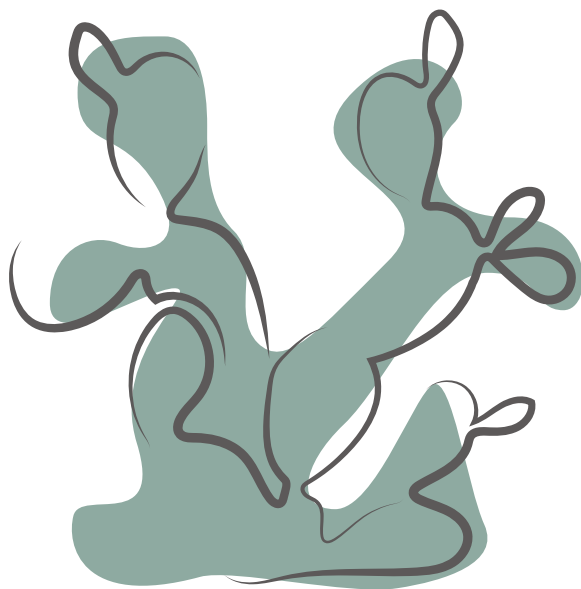
- Ancín-azpilicueta, C., Esparza, I., y Jiménez-moreno, N. (2020). Biomolecules from plant residues. *Biomolecules*, 10(11), 1–5.
- Attia, G. Y., Moussa, M. E. M., y Sheashea, E. R. (2013). Characterization of red pigments extracted from red beet (*Beta vulgaris* L.) and its potential uses as antioxidant and natural food colorants. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 91(3), 1095–1110.
- Barna, D., Oláhné Tóth, I., Fári, M. G., y Bákonyi, N. (2020). Deproteinized plant juice as part of circular economy: A short review and brief experimental data. *Acta Agraria Debreceniensis*, 2, 23–26.
- Battistella-Lasta, H. F., Lentz, L., Gonçalves Rodrigues, L. G., Mezzomo, N., Vitali, L., y Salvador Ferreira, S. R. (2019). Pressurized liquid extraction applied for the recovery of phenolic compounds from beetroot waste. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21(July), 101353.
- Benito-Román, Ó., Blanco, B., Sanz, M. T., y Beltrán, S. (2020). Subcritical water extraction of phenolic compounds from onion skin wastes (*Allium cepa* cv. horcal): Effect of temperature and solvent properties. *Antioxidants*, 9(12), 1–20.
- Castro-Enríquez, D. D., Montaña-Leyva, B., Del Toro-Sánchez, C. L., Juárez-Onofre, J. E., Carvajal-Millan, E., Burruel-Ibarra, S. E., Tapia-Hernández, J. A., Barreras-Urbina, C. G., y Rodríguez-Félix, F. (2020). Stabilization of betalains by encapsulation—a review. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1587–1600.
- Choo, W. S. (2019). *Betalains: Application in Functional Foods* (pp. 1471–1498).
- Ciriminna, R., Fidalgo, A., Avellone, G., Danzi, C., Timpanaro, G., Locatelli, M., Carnaroglio, D., Meneguzzo, F., Ilharco, L. M., y Pagliaro, M. (2019). Integral Extraction of *Opuntia ficus-indica* peel bioproducts via microwave-assisted hydrodiffusion and hydrodistillation. *ACS Sustainable Chemistry y Engineering*, 7(8), 7884–7891.
- Ciriminna, R., Fidalgo, A., Danzi, C., Timpanaro, G., Ilharco, L. M., y Pagliaro, M. (2018). Betanin: a bioeconomy insight into a valued betacyanin. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(3), 2860–2865.
- Coria-Cayupán, Y., y Nazareno, M. A. (2015). Cactus betalains can be used as antioxidant colorants protecting food constituents from oxidative damage. *Acta Horticulturae*, 1067, 319–325.
- Costa, A. P. D., Hermes, V. S., Rios, A. de O., y Flôres, S. H. (2017). Minimally processed beetroot waste as an alternative source to obtain functional ingredients. *Journal of Food Science and Technology*, 54(7), 2050–2058.
- Da Silva, D. V. T., Dos Santos Baião, D., de Oliveira Silva, F., Alves, G., Perrone, D., Mere Del Aguila, E., y M. Flosi Paschoalin, V. (2019). Betanin, a natural food additive: stability, bioavailability, antioxidant and preservative ability assessments. *Molecules*, 24(3), 458.
- Das, G., Shin, H.-S., y Patra, J. K. (2020). Comparative assessment of antioxidant, anti-diabetic and cytotoxic effects of three peel/shell food waste extract-mediated silver nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, Volume 15, 9075–9088.
- Dos Santos, C. D., Scherer, R. K., Cassini, A. S., Marczak, L. D. F., y Tessaro, I. C. (2016). Clarification of red beet stalks extract by microfiltration combined with ultrafiltration. *Journal of Food Engineering*, 185, 35–41.
- Fathordoobady, F., Mirhosseini, H., Selamat, J., y Manap, M. Y. A. (2016). Effect of solvent type and ratio on betacyanins and antioxidant activity of extracts from *Hylocereus polyrhizus* flesh and peel by supercritical fluid extraction and solvent extraction. *Food Chemistry*, 202, 70–80.
- Gengatharan, A., Dykes, G. A., y Choo, W. S. (2016). Stability of betacyanin from red pitahaya (*Hylocereus polyrhizus*) and its potential application as a natural colourant in milk. *International Journal of Food Science and Technology*, 51(2), 427–434.
- Güneşer, O. (2016). Pigment and color stability of beetroot betalains in cow milk during thermal treatment. *Food Chemistry*, 196, 220–227.
- Hu, H., Yao, X., Qin, Y., Yong, H., y Liu, J. (2020). Development of multifunctional food packaging by incorporating betalains from vegetable amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) into quaternary ammonium chitosan/fish gelatin blend films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 675–684.
- Jamróz, E., Kulawik, P., Guzik, P., y Duda, I. (2019). The verification of intelligent properties of furcellaran films with plant extracts on the stored fresh Atlantic mackerel



- during storage at 2 °C. *Food Hydrocolloids*, 97(April), 105211.
- Jiménez-Alvarado, R., Aguirre-Álvarez, G., Campos-Montiel, R. G., Contreras-Esquivel, J. C., Pinedo-Espinoza, J. M., González-Aguayo, E., y Hernández-Fuentes, A. D. (2015). Effect of high-pulsed electric fields on the extraction yield and quality of juices obtained from the endocarp on nine prickly pear (*Opuntia* spp.) Varieties. *Jokull*, 65(3), 414–435.
- Jimenez-Lopez, C., Fraga-Corral, M., Carpena, M., García-Oliveira, P., Echave, J., Pereira, A. G., Lourenço-Lopes, C., Prieto, M. A., y Simal-Gandara, J. (2020). Agriculture waste valorisation as a source of antioxidant phenolic compounds within a circular and sustainable bioeconomy. *Food y Function*, 11(6), 4853–4877.
- Kanatt, S. R. (2020). Development of active/intelligent food packaging film containing *Amaranthus* leaf extract for shelf life extension of chicken/fish during chilled storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 24(December 2019), 100506.
- Kumar, S. Sravan, Manoj, P., Shetty, N. P., Prakash, M., y Giridhar, P. (2015). Characterization of major betalain pigments-gomphrenin, betanin and isobetanin from *Basella rubra* L. fruit and evaluation of efficacy as a natural colourant in product (ice cream) development. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8), 4994–5002.
- Kumar, Sandopu Sravan, Arya, M., Chauhan, A. S., y Giridhar, P. (2020). *Basella rubra* fruit juice betalains as a colorant in food model systems and shelf-life studies to determine their realistic usability. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(8), 1–9.
- Kushwaha, R., Kumar, V., Vyas, G., y Kaur, J. (2018). Optimization of different variable for eco-friendly extraction of betalains and phytochemicals from beetroot pomace. *Waste and Biomass Valorization*, 9(9), 1485–1494.
- Laqui-Vilca, C., Aguilar-Tuesta, S., Mamani-Navarro, W., Montaña-Bustamante, J., y Condezo-Hoyos, L. (2018). Ultrasound-assisted optimal extraction and thermal stability of betalains from colored quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) hulls. *Industrial Crops and Products*, 111(May 2017), 606–614.
- Li, H., Deng, Z., Liu, R., Zhu, H., Draves, J., Marcone, M., Sun, Y., y Tsao, R. (2015). Characterization of phenolics, betacyanins and antioxidant activities of the seed, leaf, sprout, flower and stalk extracts of three *Amaranthus* species. *Journal of Food Composition and Analysis*, 37, 75–81.
- Mahjoub, B., y Domscheit, E. (2020). Chances and challenges of an organic waste-based bioeconomy. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 25, 100388.
- Maran, J. P., y Priya, B. (2015). Natural pigments extraction from *Basella rubra* L. fruits by ultrasound-assisted extraction combined with Box-Behnken response surface design. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 50(10), 1532–1540.
- Maran, J. P., y Priya, B. (2016). Multivariate statistical analysis and optimization of ultrasound-assisted extraction of natural pigments from waste red beet stalks. *Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 792–799. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1988-8>
- Melgar, B., Dias, M. I., Barros, L., Ferreira, I. C. F. R., Rodriguez-Lopez, A. D., y Garcia-Castello, E. M. (2019). Ultrasound and microwave assisted extraction of *Opuntia* fruit peels biocompounds: optimization and comparison using RSM-CCD. *Molecules*, 24(19), 3618.
- Mohamed, E. E., Iwamoto, S., y Yamauchi, R. (2018). Optimization of betalain extraction from *Salicornia frutescens* and its encapsulation. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 24(1), 1–8.
- Nogueira, G. F., de Oliveira, R. A., Velasco, J. I., y Fakhouri, F. M. (2020). Methods of incorporating plant-derived bioactive compounds into films made with agro-based polymers for application as food packaging: A brief review. *Polymers*, 12(11), 1–34.
- Nutter, J., Fernandez, M. V., Jagus, R. J., y Agüero, M. V. (2020). Development of an aqueous ultrasound-assisted extraction process of bioactive compounds from beet leaves: a proposal for reducing losses and increasing biomass utilization. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, September, jsfa.10815.
- Oliveira, G., Gonçalves, I., Barra, A., Nunes, C., Ferreira, P., y Coimbra, M. A. (2020). Coffee silverskin and starch-rich potato washing slurries as raw materials for elastic, antioxidant, and UV-protective biobased films. *Food Research International*, 138(June).
- Orozco-Villafuerte, J., Escobar-Rojas, A., Buendía-González, L., García-Morales, C., Hernandez-Jaimes, C., y Alvarez-Ramirez, J. (2019). Evaluation of the protection and release rate of bougainvillea (*Bougainvillea*

- spectabilis) extracts encapsulated in alginate beads. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(7), 1065–1074.
- Otálora, M. C., de Jesús Barbosa, H., Perilla, J. E., Osorio, C., y Nazareno, M. A. (2019). Encapsulated betalains (*Opuntia ficus-indica*) as natural colorants. Case study: Gummy candies. *LWT*, 103, 222–227.
- Pérez-Loredo, M. G., Jesús, L. H. De, y Barragán-Huerta, B. E. (2017). Extraction of red pitaya (*Stenocereus stellatus*) bioactive compounds applying microwave, ultrasound and enzymatic pretreatments. *Agrociencia*, 51(2), 135–151.
- Prieto-Santiago, V., Cavia, M. M., Alonso-Torre, S. R., y Carrillo, C. (2020). Relationship between color and betalain content in different thermally treated beetroot products. *Journal of Food Science and Technology*, 57(9), 3305–3313.
- Qin, Y., Liu, Y., Zhang, X., y Liu, J. (2020). Development of active and intelligent packaging by incorporating betalains from red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel into starch/polyvinyl alcohol films. *Food Hydrocolloids*, 100(October 2019), 105410.
- Rajesh-Banu, J., Kavitha, S., Yukesh Kannah, R., Dinesh Kumar, M., Preethi, Atabani, A. E., y Kumar, G. (2020). Biorefinery of spent coffee grounds waste: Viable pathway towards circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 302(January), 122821.
- Ramli, N. S., Ismail, P., y Rahmat, A. (2014). Influence of conventional and ultrasonic-assisted extraction on phenolic contents, betacyanin contents, and antioxidant capacity of red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*). *The Scientific World Journal*, 2014, 1–7.
- Rodriguez-Amaya, D. B. (2019). Betalains. In *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 35–39). Elsevier.
- Rodríguez-Sánchez, J. A., Cruz y Victoria, M. T., y Barragán-Huerta, B. E. (2017). Betaxanthins and antioxidant capacity in *Stenocereus pruinosus*: Stability and use in food. *Food Research International*, 91, 63–71.
- Rodriguez, E. B., Vidallon, M. L. P., Mendoza, D. J. R., y Reyes, C. T. (2016). Health-promoting bioactivities of betalains from red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton and Rose) peels as affected by carbohydrate encapsulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(14), 4679–4689.
- Roriz, C. L., Barreira, J. C. M., Morales, P., Barros, L., y Ferreira, I. C. F. R. (2018). *Gomphrena globosa* L. as a novel source of food-grade betacyanins: Incorporation in ice-cream and comparison with beet-root extracts and commercial betalains. *LWT*, 92, 101–107.
- Sanchez-Gonzalez, N., Jaime-Fonseca, M. R., San Martín-Martínez, E., y Zepeda, L. G. (2013). Extraction, stability, and separation of betalains from *Opuntia joconostle* cv. using response surface methodology. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(49), 11995–12004.
- Scarano, P., Naviglio, D., Prigioniero, A., Tartaglia, M., Postiglione, A., Sciarrillo, R., y Guarino, C. (2020). Sustainability: obtaining natural dyes from waste matrices using the prickly pear peels of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Agronomy*, 10(4), 528. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040528>
- Silva, J. P. P., Bolanho, B. C., Stevanato, N., Massa, T. B., y Da Silva, C. (2020). Ultrasound-assisted extraction of red beet pigments (*Beta vulgaris* L.): Influence of operational parameters and kinetic modeling. *Journal of Food Processing and Preservation*, June, e14762.
- Slimen, I. B., Najjar, T., y Abderrabba, M. (2017). Chemical and antioxidant properties of betalains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(4), 675–689.
- Soto-Castro, D., Chávez, G. M., León-Martínez Frank, M., Araceli, S. P., Irais, A., y Franco, A.-A. (2019). Spray drying microencapsulation of betalain rich extracts from *Escontria chiotilla* and *Stenocereus queretaroensis* fruits using cactus mucilage. *Food Chemistry*, 272, 715–722.
- Swamy, G. J., Sangamithra, A., y Chandrasekar, V. (2014). Response surface modeling and process optimization of aqueous extraction of natural pigments from *Beta vulgaris* using Box-Behnken design of experiments. *Dyes and Pigments*, 111, 64–74.
- Thirugnanasambandham, K., y Sivakumar, V. (2015). Microwave assisted extraction process of betalain from dragon fruit and its antioxidant activities. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(1), 41–48.
- Utpott, M., Assis, R. Q., Pagno, C. H., Pereira Krigger, S., Rodrigues, E., de Oliveira Rios, A., y Hickmann Flôres, S. (2020). Evaluation of the use of industrial wastes on the encapsulation of betalains extracted from red pitaya pulp (*Hylocereus polyrhizus*) by Spray drying: powder stability and application. *Food and Bioprocess Technology*, 13(11), 1940–1953.

- Winans, K., Kendall, A., y Deng, H. (2017). *The history and current applications of the circular economy concept. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(September), 825–833.
- Yao, X., Hu, H., Qin, Y., y Liu, J. (2020). *Development of antioxidant, antimicrobial and ammonia-sensitive films based on quaternary ammonium chitosan, polyvinyl alcohol and betalains-rich cactus pears (Opuntia ficus-indica) extract. Food Hydrocolloids*, 106(March), 105896.
- Yüçetepe, A., Altın, G., y Özçelik, B. (2020). *A novel antioxidant source: evaluation of in vitro bioaccessibility, antioxidant activity and polyphenol profile of phenolic extract from black radish peel wastes (Raphanus sativus L. var. niger) during simulated gastrointestinal digestion. International Journal of Food Science y Technology*, ijfs.14494.
- Zin, M. M., Márki, E., y Bánvölgyi, S. (2020a). *Conventional extraction of betalain compounds from beetroot peels with aqueous ethanol solvent. Acta Alimentaria*, 49(2), 163–169.
- Zin, Moh Moh, Anucha, C. B., y Bánvölgyi, S. (2020b). *Recovery of phytochemicals via electromagnetic irradiation (Microwave-Assisted-Extraction): Betalain and phenolic compounds in perspective. Foods*, 9(7), 918.
- Zin, Moh Moh, Márki, E., y Bánvölgyi, S. (2020c). *Evaluation of reverse osmosis membranes in concentration of beetroot peel extract. Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 64(3), 340–348.



## Extracción de antioxidantes de origen polifenólico a partir de residuos agroalimentarios

Escárcega-Bustillos, Laura  
Muñoz-Castellanos, Laila  
Infante-Ramírez, Rocío  
Salas, Erika\*

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

\* Correspondencia  
ES (Erika Salas), ORCID ID: 0000-0002-8789-4443,  
esalas@uach.mx.

La extracción es una de las técnicas fundamentales para la obtención de moléculas bioactivas, como lo son los polifenoles, provenientes de los desechos agroalimentarios como cáscaras, semillas, hojas, flores, entre otros. Los métodos de extracción se clasifican dentro de dos categorías: los métodos convencionales (Soxhlet, hidrodestilación, maceración) y los no convencionales (extracción con ultrasonido, microondas, campos eléctricos pulsados, extracción con enzimas, fluidos súper críticos, presurización, entre otros).

La extracción de polifenoles en solventes es afectada por variables como la polaridad del solvente, pH, temperatura, tiempo de extracción, la relación soluto-solvente y el tamaño de partícula de la muestra. La relación de solvente/muestra más utilizado es 10:1 y 20:1 (mL/mg). Los solventes comúnmente utilizados son etanol, metanol, acetato de etilo, hexano entre otros, sin embargo, recientemente se han utilizado otro tipo de solventes alternativos como son los líquidos iónicos y los solventes eutécticos (DES Deep Eutectic Solvent ó NADES Natural Deep Eutectic Solvents por sus siglas en inglés). La elección de una temperatura óptima para la extracción es crucial, ya que los polifenoles son considerados termosensibles, por lo tanto, para llegar a la optimización y comparación de estas variables, la evaluación se basa en el rendimiento total de polifenoles y su actividad antiradical. La extracción convencional con solvente es simple de operar y el costo es menor en comparación con los otros métodos, con el inconveniente que ésta se lleva a cabo durante largos periodos de tiempo, lo que puede ocasionar la degradación de los compuestos de interés, además se utilizan solventes orgánicos que pueden ser tóxicos. Las técnicas no convencionales, al contrario, presen-

tan ventajas ya que son altamente selectivas y son amigables con el medio ambiente. En este capítulo, se realiza una revisión de los diferentes métodos de extracción de polifenoles.

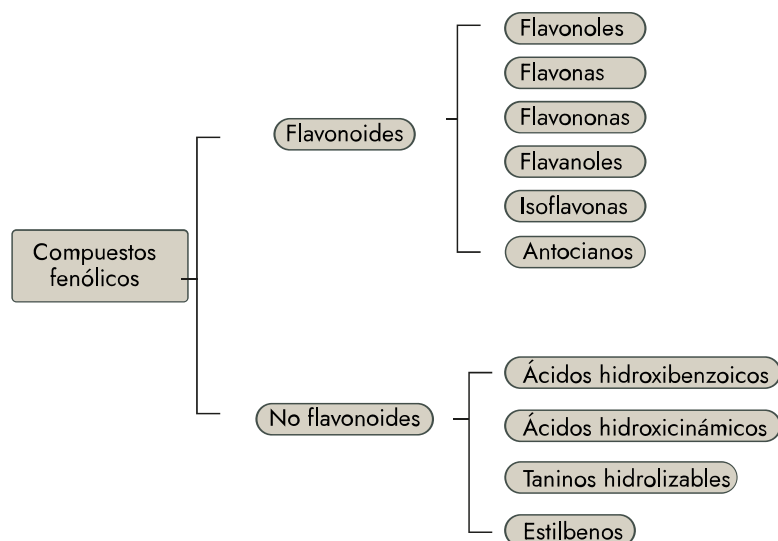
**Palabras clave:** Agroalimentario, Bioactivo, Extracción, Polifenoles, Valorización.

## 1 Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos se encuentran ampliamente distribuidos en el reino vegetal y son los metabolitos secundarios más abundantes de las plantas, con más de 8 000 estructuras fenólicas conocidas actualmente, que van desde compuestos simples como los ácidos fenólicos hasta moléculas altamente polimerizadas como los taninos. Poseen uno o más anillos aromáticos con uno o más grupos hidroxilo (Dai y Mumper, 2010). La diversidad estructural da como resultado una amplia gama de compuestos fenólicos, los cuales están clasificados en flavonoides y no flavonoides (FIGURA 1). Los ácidos fenólicos constan de dos subgrupos; ácidos hidroxibenzoicos (Ácidos

gálico, p-hidroxibenzoico, protocatechuico, vanílico y sirínico) y ácidos hidroxicinámicos (ácidos caféico, ferúlico, p-cumárico y sinápico) (FIGURA 2). Los flavonoides son el grupo más grande de fenoles de las plantas, son compuestos de bajo peso molecular, que constan de 15 átomos de carbono dispuestos en configuración C6-C3-C6. Su estructura consiste en dos anillos aromáticos A y B, unidos por un puente de 3 carbonos en forma de anillo heterocíclico (FIGURA 3). Las variaciones en los patrones de sustitución del anillo C dan como resultado las principales clases de flavonoides (flavonoles, flavonas, flavanonas, isoflavonas, flavanoles y antocianos). Los taninos constituyen el tercer grupo importante de compuestos fenólicos. Los taninos pueden ser: 1) Taninos hidrolizables, los cuales son ésteres de ácido gálico (galotaninos y elagitaninos) y se encuentran en la clasificación dentro del grupo de los no flavonoides; 2) taninos condensados, los cuales son conocidos también como proantocianidinas, son polímeros de monómeros de flavanoles (Balasundram *et al.*, 2006).

Figura 1. Clasificación de los compuestos fenólicos



Los compuestos fenólicos en las plantas están involucrados en la defensa contra la radiación ultravioleta o la agresión de patógenos, parásitos y depredadores, además de contribuir con el desarrollo de color (Dai y Mumper, 2010).



Exhiben un amplio rango de propiedades biológicas como antialérgica, antiinflamatoria, antimicrobiana, antioxidante, antivirales, anticancerígena además de propiedades cardioprotectoras y vasodilatadoras (Ben-Ali *et al.*, 2018) las cuales se derivan de su actividad antioxidante. Es por esta razón por la cual han sido ampliamente estudiados y destacan por su importancia (Balasundram *et al.*, 2006).

Figura 2. Ejemplos de ácidos hidroxibenzoicos (a) y ácidos hidroxicinámicos (b)

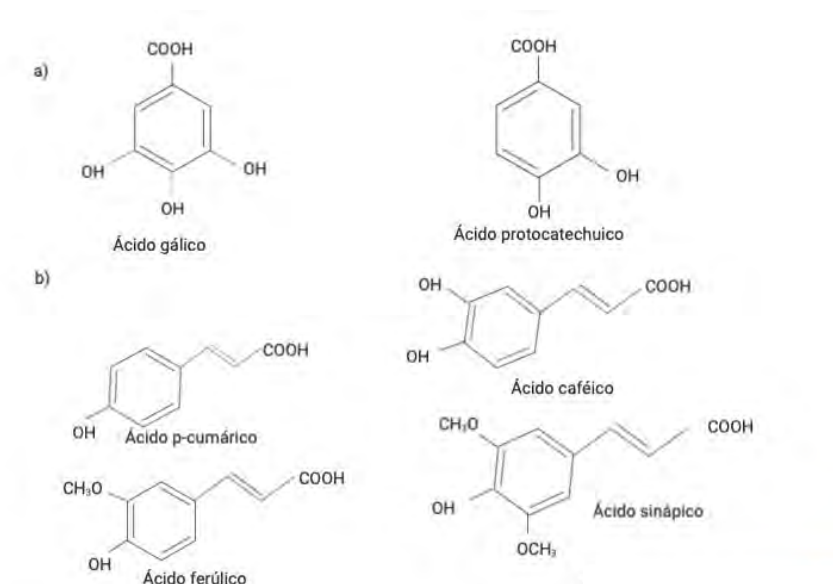
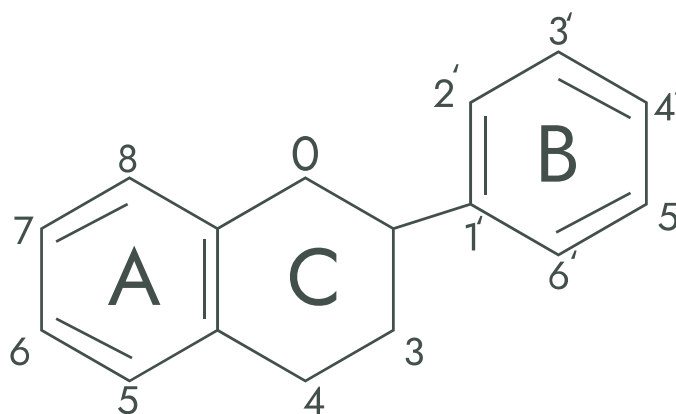


Figura 3. Estructura genérica de una molécula flavonoide



## 1.1 Fuentes de polifenoles

### 1.1.1 Frutas y verduras

La composición de compuestos fenólicos en frutas y verduras varía debido a la complejidad de estos grupos de compuestos y los métodos utilizados para la extracción y análisis. El contenido de fenoles depende de una serie de factores intrínsecos (género, especie, cultivares) y extrínsecos (agronómicos, ambientales, manipulación y almacenamiento). Las frutas son una fuente rica en flavonoides y ácidos hidroxycinámicos e hidroxibenzoicos (Balasundram *et al.*, 2006; Haminiuk *et al.*, 2012).

Se ha reportado el contenido de fenoles de diferentes frutas y verduras los cuales se muestran en la TABLA 1.

Tabla 1. Contenido total de fenoles de diversas frutas y verduras

| Fruta                                         | Contenido total de fenoles                                                                      | Referencia                                                               |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Mora                                          | 417 –555 <sup>a</sup>                                                                           | (Sellappan <i>et al.</i> , 2002)<br>(Luximon-Ramma <i>et al.</i> , 2003) |
| Plátano, Mango                                | 11.8 ± 0.4a, 56.0 ± 2.1 <sup>a</sup>                                                            | (Luximon-Ramma <i>et al.</i> , 2003)                                     |
| Piña, Arándano, Manzana                       | 94.3 ± 1.5a, 527.2 ± 21.5a, 296.3 ± 6.4 <sup>a</sup>                                            | (Yang <i>et al.</i> , 2009)                                              |
| Uva tinta                                     | 220.6 ± 61.6 <sup>b</sup>                                                                       | (Karakaya <i>et al.</i> , 2001)                                          |
| Brócoli, Repollo, Zanahoria, Cebolla amarilla | 101.6 ± 1.24a, 54.6 ± 7.0a, 56.4 ± 5.1 <sup>a</sup> , 76.3 ± 1.9 <sup>a</sup> , respectivamente | (Chu <i>et al.</i> , 2007)                                               |

<sup>a</sup>mg equivalente ácido gálico/L. <sup>b</sup>mg equivalentes ácido gálico/g de materia seca.

### 1.1.2 Bebidas

Las bebidas como jugos, té y vinos son fuentes muy importantes de fenoles en la dieta humana.

En el té verde las catequinas (flavanoles) son los compuestos predominantes. En el café los compuestos más importantes son los ácidos hidroxycinámicos (Dufresne y Farnworth, 2000).

En los vinos los constituyentes fenólicos mayoritarios incluyen los ácidos hidroxibenzoicos, ácidos hidroxycinámicos, flavonoides (quercetina y miricetina), flavanoles (catequina y epicatequina) (Minussi *et al.*, 2003).

Tabla 2. Contenido fenólico total de bebidas

| Bebida                    | Contenido de fenoles totales | Referencia                        |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Jugo comercial de naranja | 755 ± 18 <sup>a</sup>        | (Gardner <i>et al.</i> , 2000)    |
| Té verde                  | 117.3 <sup>a</sup>           | (Samman <i>et al.</i> , 2001)     |
| Café molido               | 52.5-57.0 <sup>b</sup>       | (Lakenbrink <i>et al.</i> , 2000) |
| Vino tinto (italiano)     | 3314-4177 <sup>a</sup>       | (Minussi <i>et al.</i> , 2003)    |

<sup>a</sup>mg equivalente ácido gálico/L. <sup>b</sup>mg equivalentes ácido gálico/g de materia seca.

## 1.2 Compuestos fenólicos en residuos agroalimentarios

Las frutas y vegetales generan un gran volumen de desperdicios anualmente. Estos desperdicios son una fuente valiosa de compuestos bioactivos (polifenoles). Aproximadamente el 20 % de los desechos de un total de 14 millones de toneladas métricas se generan durante el procesamiento, distribución y venta de alimentos y bebidas. En cambio en el sector industrial de frutas y verduras se generan del 25 % al 30 % de desperdicios los cuales provienen de cáscaras, semillas, corazón, vainas, piel, orujo y otras partes (Saini *et al.*, 2019).

Las pérdidas o desperdicios son el resultado involuntario de la forma en que funcionan los sistemas de producción y suministro de alimentos (Parfitt *et al.*, 2010). Estos residuos agroalimentarios contribuyen a problemas ambientales, ya que se descomponen en vertederos y emiten gases de efecto invernadero.

Varios estudios demuestran que las partes no comestibles de algunas frutas y verduras tienen mayor contenido fenólico que la pulpa o la parte comestible, tal es el caso de un estudio llevado a cabo por Da Silva (2010) y colaboradores donde analizaron diferentes frutas tropicales entre ellas, piña, manzana de cajú, mejor conocida como anacardo, guayaba, cereza de Surinam, acerola y zapote. Se encontró que para los subproductos los niveles más altos de compuestos fenólicos totales lo tenían la cereza Surinam, acerola, anacardo y la piña los cuales fueron considerados residuos agroalimentarios con alta cantidad de compuestos fenólicos en comparación con otros subproductos como la papaya, mango y maracuyá que fueron considerados con un contenido fenólico total medio.

Se han reportado diferentes compuestos bioactivos en los residuos agroalimentarios de frutas y verduras mostrados en la *TABLA 3*, donde se describe qué compuestos bioactivos son los que se encuentran en los subproductos y sus actividades.

**Tabla 3. Compuestos Bioactivos presentes en residuos de procesamiento de frutas**

| Compuesto Bioactivo | Fuente                                                                     | Rango de concentración      | Bioactividad                          | Posible aplicación/uso                           | Referencia                    |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| Flavonoles          | Pulpa de tomate, cáscara de granada, naranja y mango, semilla de tamarindo | 0.02-0.14 % p/p base húmeda | Antioxidante                          | Conservador natural<br>Anticancerígeno           | (Çam e İçyer, 2015)           |
| Ácidos fenólicos    | Cáscara de mango, naranja semilla de guayaba, pulpa de manzana             | 0.02-0.2 % p/p              | Antioxidante                          | Conservador natural<br>Anticancerígeno           | (Kothari y Seshadri, 2010)    |
| Flavononas          | Cáscaras de cítricos, pepino, tomate, semillas de cítricos                 | 2-14 % p/p                  | Antioxidante                          | Agente cardioprotector<br>Analgésico en artritis | (Attard <i>et al.</i> , 2014) |
| Proantocianidinas   | Desechos de uvas, maíz, pulpa de bayas, semillas y pericarpio de lichi     | 0.8 % p/p                   | Colorante alimenticio<br>Antioxidante | Analgésico<br>Anticancerígeno                    | (Yu <i>et al.</i> , 2007)     |

## 2. Extracción de compuestos bioactivos de residuos agroalimentarios

La extracción es el paso crucial para obtener compuestos bioactivos de los residuos agroalimentarios. Los métodos ideales de extracción determinan los tipos y cantidades adecuadas de compuestos bioactivos que pueden obtenerse de los residuos. Estos métodos pueden variar dependiendo del compuesto bioactivo que se defina como objetivo de la extracción.

Existen factores como: la temperatura, el pH, tejido de la planta, presión, el tipo de solvente, tiempo de extracción, relación sólido-líquido, tamaño de partícula de la muestra, que pueden afectar al proceso de extracción (Sagar *et al.*, 2018). Los valores óptimos de los diferentes factores o variables de extracción se pueden obtener mediante la optimización de la extracción. La optimización se lleva a cabo mediante un diseño experimental compuesto central y una metodología de superficie de respuesta, donde se optimizan las variables independientes como temperatura, tiempo y pH. La evaluación se basa en la medición de respuestas seleccionadas en los extractos obtenidos que son proporcionales al contenido fenólico total, así como el rendimiento total de polifenoles o la actividad antiradical (Mourtzinou & Goula, 2019).

La cantidad de disolvente debe ser suficiente para garantizar que todo el tejido vegetal esté sumergido en el disolvente durante todo el proceso de extracción. Las proporciones más utilizadas de disolvente: muestra (tejido vegetal) son 10:1 (mL/mg), 20:1 (mL/mg). La selección de la temperatura adecuada de extracción también es un factor importante, ya que los polifenoles se consideran termosensibles, y en algunos casos al aumentar la temperatura se produce una degradación o modificación de polifenoles, por posibles interacciones covalentes con otros constituyentes en las matrices de células vegetales. La utilización de materia vegetal pulverizada, mejora la extracción ya que aumenta el área de superficie de contacto de la muestra, lo que promueve la ruptura de la pared celular de la planta. La elección del disolvente más adecuado depende de su selectividad, miscibilidad, densidad, recuperación, precio, presión de vapor, viscosidad, estabilidad química y térmica y principalmente de su polaridad (Haminiuk *et al.*, 2012).

La preparación de la muestra es un factor crucial para determinar el tipo y la cantidad de compuesto bioactivo extraído. Antes de la extracción la muestra debe ser triturada, molida o incluso homogeneizada las cuales pueden ser posteriormente secadas al aire o liofilizadas. Se prefiere la extracción de biomasa seca a la extracción de biomasa fresca, porque las enzimas en las células frescas pueden degradar potencialmente a los ácidos fenólicos. Algunos investigadores han informado que el proceso de congelación y almacenamiento congelado a largo plazo provocan gran pérdida en el contenido fenólico y vitaminas que se encuentran en la materia vegetal (Haminiuk *et al.*, 2012). Generalmente el secado por congelación retiene mayor cantidad de fenoles en comparación con muestras secadas al aire. Así se demostró en estudios llevados a cabo por Dorta (2012) y Asami (2003) donde se compararon tres métodos de deshidratación (liofilización, secado en horno con aire estático y secado en horno con aire forzado), con diferentes sistemas de solventes (etanol: agua y agua: acetona) en cáscaras y semillas de mango como muestras, los resultados obtenidos mostraron que la cantidad de compuestos fenólicos es mayor en muestras liofilizadas utilizando como solvente etanol:agua (Dorta *et al.*, 2012). Asami por su parte, demostró en su estudio que las bayas de Marion (*Rubus* L. subgenus *Rubus*), fresas y maíz liofilizados contenían un nivel más alto de fenoles en comparación con muestras secadas al aire (Asami *et al.*, 2003). Sin embargo, otros autores reportan que los

procesos de secado, incluida la liofilización, pueden provocar efectos no deseados en los perfiles constituyentes de las muestras de plantas, por lo que queda a consideración del analista o técnico el uso de estas técnicas en la preparación de la muestra (Dai *et al.*, 2013).

El principal objetivo del proceso de extracción es maximizar el rendimiento del compuesto a extraer con un impacto mínimo o nulo en las propiedades del compuesto objetivo, mientras se minimiza la extracción de compuestos indeseables (Tiwari, 2015).

## 2.1 Métodos de extracción convencionales

### 2.1.1 Soxhlet

La extracción soxhlet ha sido muy popular y utilizada como técnica clásica para extraer componentes bioactivos útiles de diferentes partes de la planta, pero inicialmente se desarrolló para extracción de lípidos. Es una técnica donde se guarda una cantidad muy pequeña de muestra seca en un dedal, luego el dedal se guarda en el matraz de destilación que contiene el solvente. Cuando alcanza un nivel de desbordamiento, un sifón aspira la solución del porta-dedal y la devuelve al matraz de destilación. Esta solución contiene y transporta el extracto líquido a granel, el soluto del extracto permanece en el matraz de destilación y el solvente regresa a la planta sólida (Sagar *et al.*, 2018).

Las principales limitaciones que posee esta técnica son que las extracciones toman mucho tiempo y no es amigable con el medio ambiente ya que requiere de grandes cantidades de solvente y la principal ventaja de usar soxhlet es que no se requiere usar una etapa de filtración para recuperar del disolvente que contiene los compuestos fenólicos extraídos. Los solventes más usados en esta técnica son éter, hexano, etanol, metanol, acetona, acetonitrilo o agua pura, pero el más común es una solución de etanol o metanol con agua (Al Jitan *et al.*, 2018).

### 2.1.2 Hidrodestilación

Técnica clásica para la extracción de importantes aceites y diversos compuestos bioactivos de origen vegetal, y se utiliza antes de deshidratar una muestra de planta. El paso inicial de una hidrodestilación es el empaquetado de la planta en un compartimiento de destilación, luego, se agrega una cantidad suficiente de agua y se hierve. El agua caliente y vapor actúan como agentes de eliminación eficaces de los compuestos bioactivos de las células vegetales. La mezcla de vapor de aceite y agua se condensa mediante enfriamiento indirecto por agua, la mezcla condensada se mueve a un separador del condensador, es aquí donde los compuestos bioactivos y el aceite se separan automáticamente del agua. La hidrodestilación incluye tres procesos fisicoquímicos importantes denominados hidrodifusión, hidrólisis y descomposición por calor. No es bueno para compuestos termolábiles porque pueden perderse o degradarse a alta temperatura de extracción (Sagar *et al.*, 2018).

Las principales desventajas de la hidrodestilación son que no es una técnica apta para compuestos termolábiles porque pueden perderse o degradarse debido a la temperatura, además es un proceso lento y que requiere de mucho tiempo de extracción.

### 2.1.3 Maceración

Se hizo popular por su bajo costo para obtener compuestos bioactivos y aceites esenciales. Primero se tritura la muestra en partículas diminutas para mezclarlas con el solvente, se vierte una cantidad apropiada del mismo en un recipiente cerrado, luego se desecha el líquido y se logra una

cantidad de la solución preparada presionando el residuo sólido de este proceso de extracción y finalmente, la filtración se utiliza para separar el líquido prensado para eliminar las impurezas. Se usa a veces la agitación durante la maceración para aumentar la extracción de dos maneras: para aumentar la difusión y para descartar la solución concentrada de la superficie de la muestra y agregar nuevo solvente para obtener el máximo rendimiento de extracción (Haminiuk *et al.*, 2012)

#### 2.1.4 Extracción con solvente

En este tipo de extracción, la materia prima de tamaño adecuado se expone a diferentes solventes orgánicos, que absorben componentes solubles de interés y también otros agentes aromatizantes y colorantes como los antocianos. Las muestras normalmente se centrifugan y filtran para eliminar los residuos sólidos. Este método en comparación con otros es beneficioso por el bajo costo de procesamiento y la facilidad de operación. Sin embargo, es un método que utiliza solventes tóxicos, se requiere una etapa de evaporación/concentración para su recuperación y requiere por lo general grandes cantidades de solvente y un tiempo prolongado de procesamiento. Además de que existe la posibilidad de degradación térmica de los compuestos bioactivos debido a las altas temperaturas de los solventes durante los largos tiempos de extracción. La extracción con solventes se ha mejorado en combinación con otras técnicas como ultrasonido, microondas para obtener mejores rendimientos (Kumar *et al.*, 2017).

Los solventes como metanol, etanol, acetona, acetato de etilo y sus combinaciones, se han utilizado para la extracción de fenoles de materia vegetal, frecuentemente con diferentes porciones de agua. La selección del solvente afecta la cantidad de polifenoles extraídos. Generalmente se ha encontrado que el metanol es el más eficaz en la extracción de polifenoles de menor peso molecular, mientras que los de mayor peso molecular como los flavonoides se extraen mejor con una solución de acetona-agua. El etanol es otro buen solvente para la extracción de polifenoles y es seguro para el consumo humano.

La recuperación de compuestos fenólicos también está influenciada por el tiempo de extracción y temperatura. Un aumento de temperatura de extracción puede producir una mayor solubilidad del analito al aumentar tanto la solubilidad como la tasa de transferencia de masa. Además, la viscosidad y la tensión superficial de los disolventes se reducen a mayor temperatura, lo que ayuda a que los disolventes alcancen las matrices de la muestra, mejorando así la tasa de extracción. Sin embargo, muchos compuestos fenólicos se oxidan o hidrolizan fácilmente. Los largos tiempos de extracción y las altas temperaturas aumentan la posibilidad de oxidación de los compuestos, lo que produce una baja tasa de rendimiento. Por lo tanto es muy importante mantener la estabilidad de los compuestos fenólicos (Dai *et al.*, 2013).

#### 2.2 Métodos de extracción no convencionales

Los métodos no convencionales surgen debido a las limitaciones de los métodos convencionales, ya que éstos se caracterizan por la dificultad de obtener alta pureza, uso de solventes costosos, mayor tiempo de extracción, posible degradación de compuestos termolábiles y baja selectividad de extracción (Sagar *et al.*, 2018). Las técnicas no convencionales presentan alto rendimiento de extracción, procesos cortos, alta calidad y menos generación de residuos, incursionando como tecnologías verdes.



### 2.2.1 Extracción asistida con ultrasonido (EAU)

La EAU induce una mayor difusión del disolvente en los materiales celulares, mejorando así la transferencia de masa y debido a que las implosiones generadas por defecto de cavitación de la EAU, promueven el rompimiento de tejido o pared celular vegetal también facilitando la liberación de los componentes bioactivos. El rendimiento de extracción está influenciado por la frecuencia de ultrasonido y por la naturaleza del material vegetal (Kumar *et al.*, 2017).

En la EAU se aplica un rango de 20 a 2000 kHz. Es una técnica simple y de bajo costo que se basa en dos principios: uno es la difusión a través de las paredes celulares y el otro es el enjuague del contenido después de la ruptura celular. En ella se aplica el principio de cavitación en el que las ondas provocan expansión y compresión de la matriz que provoca la permeabilización de la pared celular y da como resultado un mayor rendimiento del producto deseado. La frecuencia es uno de los principales factores que tiene un efecto profundo no sólo en el rendimiento, sino también en las propiedades del compuesto. Algunos autores han reportado que usar frecuencias de más de 20 kHz afecta las propiedades fisicoquímicas de los fitoquímicos con la formación de radicales libres (Shen *et al.*, 2017).

Esta tecnología se usa ampliamente para la extracción de diversos compuestos fenólicos de diferentes partes de plantas: hojas, tallos, semillas, frutos. Este tipo de extracción muestra muchas ventajas en comparación con otras técnicas, como la baja temperatura, lo que resulta en menor degradación térmica de compuestos bioactivos y un menor tiempo de extracción. Es un método rentable a escala de laboratorio, en la industria alimentaria el ultrasonido se utiliza para esterilización, extracción y conservación (Saini *et al.*, 2019). La extracción asistida con ultrasonido se considera una tecnología verde, ya que la extracción de bioactivos se lleva a cabo utilizando biosolventes (agua o mezclas de agua-etanol) (Lavilla & Bendicho, 2017).

### 2.2.2 Extracción asistida con microondas (EAM)

Este tipo de extracción involucra las radiaciones electromagnéticas, transmitidas como ondas en el rango de frecuencia de 300 MHz a 300 GHz, entre las cuales la frecuencia más común que se utiliza es 2450 MHz que equivale a casi 600-700 Watts de energía. La técnica se basa en el principio de que la energía absorbida durante el paso de las microondas a través del medio se convierte en energía térmica, lo que facilita el procesamiento. Esta técnica provoca la ruptura de enlaces hidrógeno, cuando se calienta el solvente puesto en contacto con la muestra, lo que resulta en la rotación dipolar de las moléculas y la migración de los iones que permiten la difusión del solvente, dando lugar a la disolución de los componentes. Otros mecanismos probables implican la evaporación de la humedad dentro de las células, lo que induce una alta presión sobre la pared celular y, por tanto, cambia las propiedades físicas de los materiales y modifica la porosidad de los mismos. Esto aumenta la penetración del solvente, lo que mejora el rendimiento (Saini *et al.*, 2019).

La selección de solventes en este tipo de extracción es muy importante ya que la afinidad no es el único factor. La capacidad de absorber la radiación de microondas es el principal factor de los disolventes. Muchos disolventes como el hexano, diclorometano y tolueno, son transparentes a las microondas, esto significa que estos disolventes no se pueden calentar en microondas. Los disolventes como el dimetilsulfóxido (DMSO), el etanol y el metano tienen una alta capacidad de absorción. El agua cae en la capacidad de rango medio junto con ácido acético, butanol y dimetilformamida (DMF) (Tiwari, 2015).

Los factores principales para poder recuperar polifenoles utilizando este tipo de extracción son: tiempo de extracción, temperatura, tipo de disolvente, concentración de disolvente, relación muestra/disolvente y la potencia de microondas. El tiempo de extracción se reduce significativamente controlando la potencia. El método consume menos energía debido al eficiente proceso de calentamiento de la radiación de microondas (Panja, 2018).

### **2.2.3 Extracción mediante campo eléctrico pulsado**

El principio es aumentar el rendimiento o porcentaje de extracción rompiendo la estructura de las membranas celulares. La extracción es un proceso no térmico que permite la aplicación de corriente continua. En esta técnica, los pulsos de alto voltaje pasan a través de los materiales colocados dentro de los electrodos durante un tiempo corto, generalmente en el rango de microsegundos a milisegundos. Cuando una corriente eléctrica pasa a través de la suspensión de células, la estructura celular se destruye y así las moléculas se separan según su carga respectiva. Los factores que se tienen que considerar al diseñar un proceso de extracción mediante esta técnica son la intensidad de campo, la energía, el número de pulsos, las propiedades de los materiales y la temperatura ya que afectan el rendimiento de extracción (Saini *et al.*, 2019).

### **2.2.4 Extracción con fluido supercrítico**

La extracción con fluido supercrítico es una tecnología respetuosa con el medio ambiente y se utiliza para la extracción de compuestos bioactivos de origen natural como plantas, subproductos alimentarios, algas y microalgas. El dióxido de carbono supercrítico (SC-CO<sub>2</sub>) es una atractiva alternativa a los solventes orgánicos, ya que no es explosivo, tóxico y además es económico. Tiene la capacidad de solubilizar sustancias lipofílicas, y se puede eliminar fácilmente de los productos finales. Durante el proceso la materia prima se coloca en un recipiente de extracción que está equipado con controladores de temperatura y presión para mantener las condiciones requeridas. Luego el recipiente de extracción se presuriza con el fluido mediante una bomba. Una vez que el fluido y los compuestos disueltos son transportados a los separadores, los productos se recogen a través de un grifo ubicado en la parte inferior. Finalmente, el fluido se regenera y se recicla o se libera al medio ambiente. La selección de fluidos supercríticos es muy importante para el funcionamiento del proceso y se pueden utilizar una amplia gama de compuestos como disolventes (Kumar *et al.*, 2017).

El dióxido de carbono es el disolvente más utilizado en el sector alimentario, ya que es seguro y las condiciones críticas son fáciles de alcanzar (30.9 °C y 73.8 bares). Sin embargo, la mayor limitación que tiene es su baja polaridad, que puede mejorarse con el uso de disolventes polares (metanol, etanol, acetona) que mejoran el poder solvatante y potencian su eficiencia de extracción minimizando las interacciones entre los analitos y la matriz. Además la baja difusibilidad del solvente en la matriz, el tiempo de extracción extendido, el requisito de alta presión, la infraestructura costosa, la variación en términos de consistencia y reproducibilidad durante el proceso, son algunas limitaciones que dificultan la escalabilidad de esta técnica (Saini *et al.*, 2019).

La aplicación de CO<sub>2</sub> supercrítico muestra un buen desempeño en la extracción de sustancias no polares, como aceite, ácidos grasos, carotenoides y tocoferoles, por lo que no presenta buen desempeño en la recuperación de compuestos de desechos/subproductos ricos en agua. La extracción supercrítica presenta gran interés para la extracción de biomoléculas hidrofóbicas, como alternativa más ecológica a la extracción con solventes orgánicos clásicos, que en general, no son amigables con el medio ambiente (Rodríguez *et al.*, 2017).

### 2.2.5 Extracción asistida por enzimas

Esta técnica se utiliza generalmente cuando los fitoquímicos se encuentran dispersos en el citoplasma celular y la presencia de enlaces hidrógeno o hidrófobos en la red polisacárido-lignina, y representan una dificultad en la extracción por técnicas convencionales. El propósito principal de la enzima en la extracción de materiales vegetales es romper o ablandar las paredes celulares, así se da el acceso de los componentes bioactivos al solvente, ya que las enzimas ayudan a liberar estos componentes de una manera única al digerir los materiales circundantes, siendo esta una técnica eficaz para extraer polifenoles que se unen a proteínas o carbohidratos dentro de las células o en las paredes celulares.

Las enzimas que más se utilizan son celulasa, pectinasa, proteasa. El tamaño de partícula y la proporción de enzima-muestra son factores de control clave para maximizar el rendimiento de extracción. El paso principal del método es la hidrólisis enzimática, donde se incuba una mezcla de muestra, enzima y disolvente (agua) a bajas temperaturas, alrededor de 35-50 °C, con pH ajustado. La enzima funciona mejor en medio ácido. La principal ventaja es que es un método respetuoso con el medio ambiente. El agua es ampliamente usada en lugar de solventes orgánicos o químicos. La extracción a baja temperatura evita la degradación y el proceso requiere de poca energía. El principal inconveniente es el tiempo de extracción prolongado, que puede variar de 1 hora a 48 horas. El extractante se separa por filtración o centrifugación (Panja, 2018), otro de los inconvenientes es la limitación técnica a gran escala ya que existe un mayor costo relativo para procesar grandes volúmenes de materia prima (Rodríguez *et al.*, 2017).

### 2.2.6 Extracción líquida presurizada

La extracción líquida presurizada, se realiza utilizando solventes líquidos a temperatura y presión elevadas (pero por debajo de sus valores de punto crítico), mejorando así la solubilidad y las propiedades de transferencia de masa, en comparación con las técnicas realizadas a temperatura ambiente y presión atmosférica o cerca de ella.

Esta técnica puede considerarse como un proceso de extracción verde, especialmente cuando se utiliza un solvente no tóxico (agua y/o mezclas agua etanol). Para llevar a cabo esta extracción la matriz de la muestra se coloca en la celda de extracción. A partir de aquí, hay dos configuraciones principales para los modos extracción líquida presurizada, estática y dinámica. En el modo estático el disolvente se presuriza en el extractor, manteniendo la válvula de salida cerrada. Después de la extracción, esta válvula se abre para liberar el extracto obtenido. Este proceso por lotes podría llevarse a cabo utilizando varios ciclos con la adición de disolvente nuevo en cada ciclo. En modo dinámico, el disolvente se bombea continuamente a través del vegetal, manteniendo abiertas las válvulas de entrada y salida durante la extracción. La extracción estática se considera mejor por la mayor penetración del solvente en los poros de la fuente vegetal (Rodríguez *et al.*, 2017).

El agua es el solvente adecuado para extraer selectivamente (a diferentes temperaturas) compuestos orgánicos polares a apolares de diferentes matrices de biomasa. La alta temperatura utilizada durante este tipo de extracción aumenta la capacidad del solvente para solubilizar los solutos, aumentando la difusión, rompiendo los enlaces soluto-matriz y disminuyendo la viscosidad y tensión superficial del solvente. La presión se mantiene entre 4 a 20 MPa, lo que asegura que el solvente se mantenga en estado líquido. Así que el solvente puede penetrar los poros de la matriz, mejorando la solubilidad de los compuestos (Álvarez *et al.*, 2014).

Las ventajas de este tipo de extracción en comparación con otras son el corto tiempo de extracción, se usa menor cantidad de solvente y se tienen mayores rendimientos. Pero no es apta para compuestos termolábiles, debido a que las altas temperaturas pueden afectar su estructura y actividad funcional (Piasek *et al.*, 2011). La recuperación de compuestos bioactivos es desafiante debido a la naturaleza selectiva de los métodos de extracción. Debido a que la selección de métodos se puede ver afectada por la cantidad de material ya que es de naturaleza perecedera, y la mayoría de los métodos convencionales son difíciles de escalar (Banerjee *et al.*, 2017).

Las técnicas de extracción de subproductos agroalimentarios son diversas, el diseño experimental varía de acuerdo a la cantidad de compuestos fenólicos y al tipo de solvente utilizado, lo cual repercute en el rendimiento final (TABLA 4).

Tabla 4. Técnicas de extracción de compuestos fenólicos de subproductos agroalimentarios

| Residuo agroindustrial (Moléculas /Compuestos extraídos)                                                                                                                                        | Técnica de extracción                                     | Proporción Solventes/ muestra, (condiciones)                                                                                                                                 | Referencia                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Cáscara de granada<br>Polifenoles totales<br>40 % de polifenoles en acetona<br>34.5 % de polifenoles en metanol<br>25.3 % de polifenoles en etanol<br>10 % de polifenoles en agua               | Extracción con solvente, ultrasonido, fluido supercrítico | Acetona<br>Metanol<br>Etanol<br>Agua<br>Acetato de etilo<br>2.5 :40 g/mL                                                                                                     | (Yasoubi <i>et al.</i> , 2007)        |
| Extracción con acetona por sonicación mostró mejores rendimientos con respecto a los otros tipos de extracción                                                                                  |                                                           |                                                                                                                                                                              |                                       |
| Cáscara de granada<br>Fenoles totales tratamiento # 7: 59.98 mgEAG/g (miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de materia seca).<br>Fenoles totales tratamiento # 13: 70.85 mgEAG/g | Extracción convencional (maceración) Ultrasonido          | Tratamiento 7: (30oC, 0.04 g/mL; 50 % etanol)<br>Tratamiento 13: (90oC, 0.02 g/mL; agua)<br><br>Se concluye que el mejor solvente es el agua y el mejor método la maceración | (Salinas-Flores <i>et al.</i> , 2019) |
| Cáscara de uva.<br>373 mg flavan-3-ol/100g.<br>34 mg flavonol glicósido/100g<br>908 mg eq.<br>Ácido elágico/100 g                                                                               | Extracción asistida por enzimas                           | Mezcla de enzimas: Pectinasa con celulosa y hemicelulosa (Lallzyme EXV)                                                                                                      | (Tomaz <i>et al.</i> , 2016)          |
| Cáscara de naranja Compuestos fenólicos totales 34.8 mg eq ácido elágico/100 g                                                                                                                  | Extracción con campo eléctrico pulsado                    | Solvente agua, campo eléctrico: 20 kV/cm, energía: 24 kJ/kg, frecuencia:0.5 Hz, Pulso:60 µs                                                                                  | (Luengo <i>et al.</i> , 2013)         |

Lo importante de la elección de la técnica correcta de extracción dependerá de los recursos económicos disponibles. Con la extracción con microondas se puede automatizar, controlar la presión y se pueden procesar muchas muestras en una sola extracción, es muy simple y es un proceso rápido. Con fluido supercrítico y líquidos presurizados se pueden producir extractos puros a través de variación de presión y temperatura, lo único malo es que se ocupan equipos muy costosos y muy especializados. En la extracción con ultrasonido se mejoran los rendimientos, se usan solventes verdes, es un proceso rápido y no es nada costoso. Se recomienda el uso de las nuevas tecnologías porque son amigables con el medio ambiente (Al Jitan *et al.*, 2018).

### 3. Solventes Eutécticos Profundos

Los solventes eutécticos profundos (DES) se desarrollaron como alternativa para superar los problemas ambientales de los líquidos iónicos. Los DES tienen propiedades físicas y químicas comparables con los líquidos iónicos, pero son más fáciles de sintetizar y son más estables, rentables y la mayoría de ellos son ecológicos. Han demostrado gran potencial en las tecnologías emergentes de extracción ecológica y se espera que sean ampliamente usados en la industria los próximos años. Los DES son mezclas eutécticas de ácidos y bases de Lewis o Bronsted. Se producen mediante la formación de un complejo entre una sal de amonio cuaternario con una sal metálica o un donante de enlaces hidrógeno (aminas, ácidos carboxílicos, azúcares, alcoholes). La deslocalización de la carga a través del enlace hidrógeno da como resultado la disminución del punto de fusión de la mezcla.

Los DES se preparan fácilmente mezclando los componentes y se clasifican según la naturaleza del agente complejante en cuatro categorías:

**Tipo I:** Compuestos por una sal de amonio cuaternario y un cloruro metálico.

**Tipo II:** Cloruro metálico hidrato.

**Tipo III:** Donante de enlaces hidrógeno.

**Tipo IV:** Cloruro de metálico.

En cuanto a la aplicabilidad de los DES en la valorización de residuos agroalimentarios, los DES tipo III han sido los más estudiados ya que tienen mayor potencial en el procesamiento de biomasa debido a su rápida y fácil preparación, no reactividad con el agua, naturaleza biodegradable y rentabilidad. El DES más utilizado está compuesto por cloruro de colina mezclado con diferentes grupos funcionales químicos (donante de enlace hidrógeno) (Torres-Valenzuela *et al.*, 2020).

El uso de solventes emergentes tiene un interés actual por los procesos verdes para la recuperación de compuestos bioactivos a partir de residuos agroalimentarios. Con este tipo de solventes se han extraído una amplia variedad de compuestos bioactivos como alcaloides, compuestos fenólicos, aceites esenciales y proteínas, lo que confirma su capacidad de solvatación y versatilidad (Benvenuti *et al.*, 2019).

## 4. Usos y aplicaciones de los compuestos fenólicos

Los fenoles son compuestos químicamente reactivos que ejercen un efecto sobre los sistemas biológicos. Han recibido mucha atención de los campos de investigación farmacéutica y medicinal porque desempeñan un papel muy importante en la prevención de enfermedades humanas.

Los ácidos fenólicos son antioxidantes naturales con propiedades redox que les permiten actuar como agentes reductores, donantes de hidrógeno y extintores de oxígeno singlete. La actividad antioxidante de los ácidos fenólicos se atribuye a su estructura química. Algunos estudios evaluaron la actividad antioxidante de varios compuestos fenólicos (ácido protocatechuico, ácido gálico, ácido p-hidroxibenzoico, ácido cinámico, ácido p-cumárico, ácido cafeico, y ácido ferúlico) y versiones glucuronadas, metiladas y sulfatadas de los ácidos fenólicos parentales. Los metabolitos del ácido fenólico modificado exhiben una menor actividad antioxidante en comparación con los ácidos fenólicos parentales, donde también se demostró la importancia de la posición y el número de grupos hidroxilos presentes en la estructura parental. Se determinó que la actividad antioxidante aumenta con un número creciente de grupos hidroxilo en la estructura del ácido fenólico parental, siendo los monofenoles captadores de radicales menos eficaces que los polihidroxifenoles. La posición del grupo hidroxilo con relación al grupo carboxilo afecta la actividad antioxidante del ácido fenólico, siendo los hidroxilos en la posición meta más efectivos que los de las posiciones orto y para (Gomes *et al.*, 2003). Además de su actividad antioxidante, los ácidos fenólicos también pueden controlar las células en procesos de señalización celular durante la inflamación y se ha informado que suprimen la sobreproducción de mediadores inflamatorios que conducen a diferente daño celular (Li *et al.*, 2014).

Estas moléculas antioxidantes (compuestos fenólicos) se pueden utilizar en los alimentos para prevenir o retrasar la oxidación de los lípidos, representan una alternativa para superar el deterioro de la calidad de los productos alimenticios a base de lípidos. El ácido protocatechuico ha sido reconocido como un potente antioxidante, además posee propiedades antibacterianas, anticancerígenas, antiinflamatorias entre otras, este ácido se ha aislado de flores secas de *Hibiscus sabdariffa* L. La incorporación del ácido protocatechuico en matrices ricas en lípidos es compleja debido a la baja solubilidad que éste presenta. Para contrarrestar este problema se ha utilizado la lipofilización de compuestos fenólicos, por esterificación con un acilo o alquilo donante, como estrategia para mejorar su desempeño en medios heterogéneos, como lo son los productos alimenticios (Laguerre *et al.*, 2013). Al insertar una determinada longitud de cadena de carbono, se alcanza un umbral, llamado efecto de corte, donde después se observa una disminución drástica de la capacidad antioxidante (Villeneuve, 2007). Se realizó en un estudio la esterificación del ácido protocatechuico con algunos donantes de acilo y alquilo y se evaluaron sus propiedades biológicas. Los hallazgos mostraron que, independientemente de la longitud de cadena de carbono, exhibían actividad antifúngica, antioxidante y antiradical. Se concluyó que la lipofilización podría afectar positivamente la actividad antioxidante del ácido protocatechuico en medio heterogéneo; por lo tanto, se respalda su uso como una forma innovadora de sintetizar moléculas con una capacidad antioxidante mejorada y potencial, para ser utilizadas como conservantes multifuncionales en alimentos (Grajeda-Iglesias *et al.*, 2016).



## 5. Conclusión

Es relevante asumir la economía circular como eje integrador de la actividad económica global. La transformación de residuos en materias primas secundarias de calidad y la reducción de la contaminación que puede ocasionar un residuo, nos conducen a innovar en los métodos de extracción en las materias primas con métodos sustentables. El reto científico y tecnológico es obtener ventajas competitivas de nuevos procesos de fabricación, plantear el uso más eficaz de los productos a través del diseño ecológico de un ciclo de vida sustentable. Todo esto mediante el uso de nuevas técnicas, más verdes e implementación de reacciones mediante las cuales se logra transformar estas moléculas para poder ser usadas en diferentes campos y para beneficio de la población, el medio ambiente y la industria.

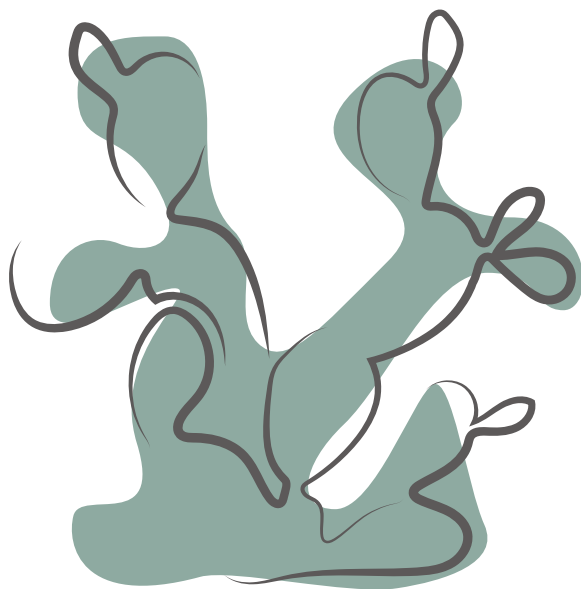
## 6. Referencias

- Al-Sayed, H. M. A., & Ahmed, A. R. (2013). Utilization of watermelon rinds and sharlyn melon peels as a natural source of dietary fiber and antioxidants in cake. *Annals of Agricultural Sciences*, 58(1), 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2013.01.012>
- Al Jitan, S., Alkhoori, S. A., & Yousef, L. F. (2018). Phenolic Acids From Plants: Extraction and Application to Human Health. In *Studies in Natural Products Chemistry* (1st ed., Vol. 58). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64056-7.00013-1>
- Alvarez, V. H., Cahyadi, J., Xu, D., & Saldaña, M. D. A. (2014). Optimization of phytochemicals production from potato peel using subcritical water: Experimental and dynamic modeling. *Journal of Supercritical Fluids*, 90, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.02.013>
- Ambigaipalan, P., De Camargo, A. C., & Shahidi, F. (2016). Phenolic Compounds of Pomegranate Byproducts (Outer Skin, Mesocarp, Divider Membrane) and Their Antioxidant Activities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(34), 6584–6604. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b02950>
- Asami, D. K., Hong, Y. J., Barrett, D. M., & Mitchell, A. E. (2003). Comparison of the total phenolic and ascorbic acid content of freeze-dried and air-dried marionberry, strawberry, and corn grown using conventional, organic, and sustainable agricultural practices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(5), 1237–1241. <https://doi.org/10.1021/jf020635c>
- Attard, T. M., Watterson, B., Budarin, V. L., Clark, J. H., & Hunt, A. J. (2014). Microwave assisted extraction as an important technology for valorising orange waste. *New Journal of Chemistry*, 38(6), 2278–2283. <https://doi.org/10.1039/c4nj00043a>
- Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, 99(1), 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.042>
- Banerjee, J., Singh, R., Vijayaraghavan, R., MacFarlane, D., Patti, A. F., & Arora, A. (2017). Bioactives from fruit processing wastes: Green approaches to valuable chemicals. *Food Chemistry*, 225, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.093>
- Ben-Ali, S., Akermi, A., Mabrouk, M., & Ouederni, A. (2018). Optimization of extraction process and chemical characterization of pomegranate peel extract. *Chemical Papers*, 72(8), 2087–2100. <https://doi.org/10.1007/s11696-018-0427-5>
- Benvenuti, L., Zielinski, A. A. F., & Ferreira, S. R. S. (2019). Which is the best food emerging solvent: IL, DES or NADES? *Trends in Food Science and Technology*, 90(January), 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.06.003>
- Brighenti, V., Groothuis, S. F., Prencipe, F. P., Amir, R., Benvenuti, S., & Pellati, F. (2017). Metabolite fingerprinting of *Punica granatum* L. (pomegranate) polyphenols by means of high-performance liquid chromatography with diode array and electrospray ionization-mass spectrometry detection. *Journal of Chromatography A*, 1480, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2016.12.017>
- Bustamante, A., Hinojosa, A., Robert, P., & Escalona, V. (2017). Extraction and microencapsulation of bioactive compounds from pomegranate (*Punica granatum* var. Wonderful) residues. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 1452–1462. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13422>
- Çam, M., & Hişil, Y. (2010). Pressurised water extraction of polyphenols from pomegranate peels. *Food Chemistry*, 123(3), 878–885. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.05.011>
- Çam, M., & İçyer, N. C. (2015). Phenolics of pomegranate peels: extraction optimization by central composite design and alpha glucosidase inhibition potentials. *Journal of Food Science and Technology*, 52(3), 1489–1497. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1148-y>
- Chu, Y., Sun, J., Wu, X., & Liu, R. H. (2007). Antioxidant and antiproliferative activities of common vegetables. *European Food Research & Technology*, 226(1–2), 6910–6916. <https://doi.org/10.1533/9781855736160.1>
- Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*, 15(10), 7313–7352. <https://doi.org/10.3390/molecules15107313>
- Dai, Y., van Spronsen, J., Witkamp, G. J., Verpoorte, R., & Choi, Y. H. (2013). Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Analytica Chimica Acta*, 766, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.12.019>

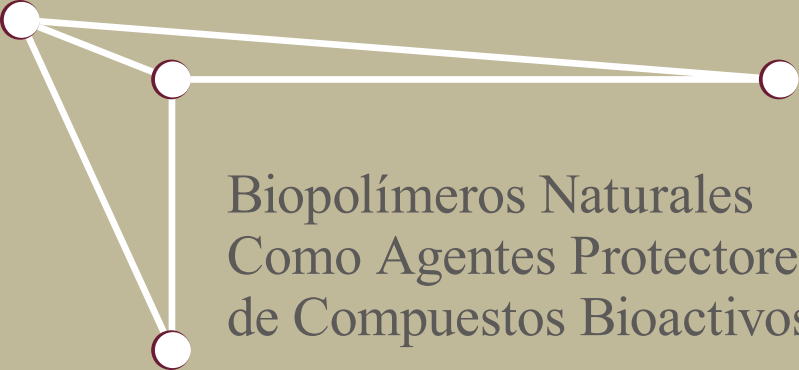
- Dorta, E., Lobo, M. G., & González, M. (2012). Using drying treatments to stabilise mango peel and seed: Effect on antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 45(2), 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.08.016>
- Dufresne, C., & Farnworth, E. (2000). Tea, Kombucha, and health: A review. *Food Research International*, 33(6), 409–421. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00067-3)
- Fernández-Ponce, M. T., Casas, L., Mantell, C., Rodríguez, M., & Martínez De La Ossa, E. (2012). Extraction of antioxidant compounds from different varieties of *Mangifera indica* leaves using green technologies. *Journal of Supercritical Fluids*, 72, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2012.07.016>
- Gardner, P. T., White, T. A. C., McPhail, D. B., & Duthie, G. G. (2000). The relative contributions of vitamin C, carotenoids and phenolics to the antioxidant potential of fruit juices. *Food Chemistry*, 68(4), 471–474. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00225-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00225-3)
- Gomes, C. A., Girão Da Cruz, T. G., Andrade, J. L., Milhazes, N., Borges, F., & Marques, M. P. M. (2003). Anticancer Activity of Phenolic Acids of Natural or Synthetic Origin: A Structure-Activity Study. *Journal of Medicinal Chemistry*, 46(25), 5395–5401. <https://doi.org/10.1021/jm030956v>
- Grajeda-Iglesias, C., Salas, E., Barouh, N., Baréa, B., Panya, A., & Figueroa-Espinoza, M. C. (2016). Antioxidant activity of protocatechuates evaluated by DPPH, ORAC, and CAT methods. *Food Chemistry*, 194, 749–757. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.119>
- Haminiuk, C. W. I., Maciel, G. M., Plata-Oviedo, M. S. V., & Peralta, R. M. (2012). Phenolic compounds in fruits - an overview. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(10), 2023–2044. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03067.x>
- Kaderides, K., Papaoikonomou, L., Serafim, M., & Goula, A. M. (2019). Microwave-assisted extraction of phenolics from pomegranate peels: Optimization, kinetics, and comparison with ultrasounds extraction. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 137(November 2018), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.01.006>
- Karakaya, S., El, S. N., & Taş, A. A. (2001). Antioxidant activity of some foods containing phenolic compounds. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 52(6), 501–508. <https://doi.org/10.1080/713671810>
- Kothari, V., & Seshadri, S. (2010). In vitro antibacterial activity in seed extracts of *Manilkara zapota*, *Anona squamosa*, and *Tamarindus indica*. *Biological Research*, 43(2), 165–168. <https://doi.org/10.4067/S0716-97602010000200003>
- Kumar, K., Yadav, A. N., Kumar, V., Vyas, P., & Dhaliwal, H. S. (2017). Food waste: a potential bioresource for extraction of nutraceuticals and bioactive compounds. *Bioresources and Bioprocessing*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0148-6>
- Laguerre, M., Bayrasy, C., Lecomte, J., Chabi, B., Decker, E. A., Wrutniak-Cabello, C., Cabello, G., & Villeneuve, P. (2013). How to boost antioxidants by lipophilization? *Biochimie*, 95(1), 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2012.07.018>
- Lakenbrink, C., Lapczynski, S., Maiwald, B., & Engelhardt, U. H. (2000). Flavonoids and other polyphenols in consumer brews of tea and other caffeinated beverages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(7), 2848–2852. <https://doi.org/10.1021/jf9908042>
- Larrosa, M., García-Conesa, M. T., Espín, J. C., & Tomás-Barberán, F. A. (2010). Ellagitannins, ellagic acid and vascular health. *Molecular Aspects of Medicine*, 31(6), 513–539. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2010.09.005>
- Lavilla, I., & Bendicho, C. (2017). Fundamentals of Ultrasound-Assisted Extraction. In *Water Extraction of Bioactive Compounds: From Plants to Drug Development*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809380-1.00011-5>
- Li, H., Lee, H. S., Kim, S. H., Moon, B., & Lee, C. (2014). Antioxidant and Anti-inflammatory Activities of Methanol Extracts of *Tremella fuciformis* and Its Major Phenolic Acids. *Journal of Food Science*, 79(4), 460–468. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12393>
- Luengo, E., Álvarez, I., & Raso, J. (2013). Improving the pressing extraction of polyphenols of orange peel by pulsed electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 17, 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.10.005>
- Luximon-Ramma, A., Bahorun, T., & Crozier, A. (2003). Antioxidant actions and phenolic and vitamin C contents of common Mauritian exotic fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(5), 496–502. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1365>

- Minussi, R. C., Rossi, M., Bologna, L., Cordi, L., Rotilio, D., Pastore, G. M., & Durán, N. (2003). Phenolic compounds and total antioxidant potential of commercial wines. *Food Chemistry*, 82(3), 409–416. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00590-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00590-3)
- Mourtzinou, I., & Goula, A. (2019). Polyphenols in Agricultural Byproducts and Food Waste. In *Polyphenols in Plants* (2nd ed.). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813768-0.00002-5>
- Panja, P. (2018). Green extraction methods of food polyphenols from vegetable materials. *Current Opinion in Food Science*, 23, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.11.012>
- Parfitt, J., Barthel, M., & MacNaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065–3081. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>
- Piasek, A., Kusznerewicz, B., Grzybowska, I., Malinowska-Pańczyk, E., Piekarska, A., Azqueta, A., Collins, A. R., Namieśnik, J., & Bartoszek, A. (2011). The influence of sterilization with EnbioJet® Microwave Flow Pasteurizer on composition and bioactivity of aronia and blue-berried honeysuckle juices. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(6), 880–888. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.04.005>
- Rodriguez, M. M., Nolasco, S. M., & Dimitrov, K. (2017). Extracting Valuable Bioactive Compounds Using Green Processes. In *Ingredients Extraction by Physico-Chemical Methods in Food*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811521-3/00004-1>
- Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M., & Lobo, M. G. (2018). Fruit and Vegetable Waste: Bioactive Compounds, Their Extraction, and Possible Utilization. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(3), 512–531. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>
- Saini, A., Panesar, P. S., & Bera, M. B. (2019). Valorization of fruits and vegetables waste through green extraction of bioactive compounds and their nanoemulsions-based delivery system. *Bioresources and Bioprocessing*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-019-0261-9>
- Salinas-Flores, A., Guevara-Aguilar, A., Natividad-Torres, E. A., Baeza-Jiménez, R., & Buenrostro-Figueroa, J. J. (2019). Efecto de las condiciones de extracción sobre la capacidad antioxidante de compuestos fenólicos de cáscara de granada. *Mexican Journal of Biotechnology*, 4(2), 33–46. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2019.4.2.33>
- Samman, S., Sandström, B., Toft, M. B., Bukhave, K., Jensen, M., Sørensen, S. S., & Hansen, M. (2001). Green tea or rosemary extract added to foods reduces non-heme-iron absorption. *American Journal of Clinical Nutrition*, 73(3), 607–612. <https://doi.org/10.1093/ajcn/73.3.607>
- Sánchez-Moreno, C., A. Larrauri, J., & Saura-Calixto, F. (1999). Free radical scavenging capacity and inhibition of lipid oxidation of wines, grape juices and related polyphenolic constituents. *Food Research International*, 32(6), 407–412. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00097-6](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00097-6)
- Sellappan, S., Akoh, C. C., & Krewer, G. (2002). Phenolic compounds and antioxidant capacity of Georgia-grown blueberries and blackberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(8), 2432–2438. <https://doi.org/10.1021/jf011097r>
- Shen, X., Shao, S., & Guo, M. (2017). Ultrasound-induced changes in physical and functional properties of whey proteins. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(2), 381–388. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13292>
- Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications. *Chemical Reviews*, 114(21), 11060–11082. <https://doi.org/10.1021/cr300162p>
- Tiwari, B. K. (2015). Ultrasound: A clean, green extraction technology. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 71, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.04.013>
- Tomaz, I., Maslov, L., Stupić, D., Preiner, D., Ašperger, D., & Kontić, J. K. (2016). Recovery of flavonoids from grape skins by enzyme-assisted extraction. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 51(2), 255–268. <https://doi.org/10.1080/01496395.2015.1085881>
- Torres-Valenzuela, L. S., Ballesteros-Gómez, A., & Rubio, S. (2020). Green Solvents for the Extraction of High Added-Value Compounds from Agri-food Waste. *Food Engineering Reviews*, 12(1), 83–100. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09206-y>
- Villeneuve, P. (2007). Lipases in lipophilization reactions. *Biotechnology Advances*, 25(6), 515–536. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.06.001>

- Yang, J., Liu, R. H., & Halim, L. (2009). Antioxidant and antiproliferative activities of common edible nut seeds. *LWT - Food Science and Technology*, 42(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.07.007>
- Yasoubi, P., Barzegar, M., Sahari, M. A., & Azizi, M. H. (2007). Total Phenolic Contents and Antioxidant Activity of Pomegranate (*Punica granatum* L.) Peel Extracts. *J. Agric. Sci. Technol*, 9, 35–42.
- Yu, J., Dandekar, D. V., Toledo, R. T., Singh, R. K., & Patil, B. S. (2007). Supercritical fluid extraction of limonoids and naringin from grapefruit (*Citrus paradisi* Macf.) seeds. *Food Chemistry*, 105(3), 1026–1031. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.04.062>







## Biopolímeros Naturales Como Agentes Protectores de Compuestos Bioactivos

Jiménez-Fernández, Maribel  
Pascual-Pineda, Luz Alicia  
Beristain-Guevara, César Ignacio\*

Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos,  
Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. México.

\* Correspondencia  
C. I. B. ORCID 0000-0002-8932-9835,  
e-mail: cberistain@uv.mx, Tel. 2288418900

México es un país con grandes recursos naturales, donde su biodiversidad vegetal nos ofrece enormes beneficios para la población; más allá del suministro de materias primas, ya que las sustancias fitoquímicas que se encuentran en estas, además de proporcionarles color, olor y sabor se asocian a múltiples beneficios a la salud. Una de las principales áreas de oportunidad es la protección contra el deterioro de estas sustancias bioactivas. Es por eso que, en esta revisión se presentan los principales fitoquímicos que se han usado para preservar y mejorar la salud, así como los diferentes métodos para protegerlos a través de sistemas líquidos y sólidos estructurados utilizando biopolímeros como barrera de protección. Haciendo hincapié en los diferentes biopolímeros que pueden ser utilizados para este propósito y que también funcionan como vehículo para que las sustancias activas sean liberadas en el sitio correcto de acción. Por último, se presenta información de los sistemas dispersos en pruebas *in vitro* e *in vivo*.

**Palabras clave:** Biopolímeros, Compuestos bioactivos, Encapsulación, Materiales de pared.



## Introducción

En el territorio mexicano se cultivan frutas, vegetales, tubérculos, granos y leguminosas, que en su mayoría se consumen en fresco, una parte se destina para su transformación y otra se pierde por razones diferentes. La riqueza de estos productos en compuestos bioactivos les proporciona un valor agregado, lo cual se ha observado en la medicina tradicional y en estudios *in vivo* e *in vitro*, que permiten atribuirle propiedades que benefician y mejoran la salud. Lamentablemente, los compuestos bioactivos son susceptibles a la degradación, por lo cual se ha estudiado la forma de protegerlos a través de diferentes métodos.

Por otra parte, existen biopolímeros obtenidos de

fuentes naturales que pueden ser usados para proteger estos compuestos, entre los cuales se encuentran las proteínas y los carbohidratos de origen vegetal, así como exudados de árboles. Esta revisión está enfocada en forma general a los usos y aplicaciones que pueden tener los recursos vegetales de nuestro país aprovechando su potencial nutraceutico y funcional favoreciendo la economía circular. Se destaca el uso de los biopolímeros naturales como protectores de colorantes, antioxidantes, vitaminas, antimicrobianos, prebióticos y probióticos. Se incluyen procesos de estabilización que se logran a través de la formación de coloides, la elaboración de emulsiones usando métodos de baja y alta energía y la fabricación de microcápsulas. La utilización de los biopolímeros naturales para proteger las sustancias bioactivas representa una forma de aprovechar productos y subproductos de fuentes naturales, que en muchas ocasiones no tienen uso, transformándolos para el beneficio del ser humano, favoreciendo de esta manera el medio ambiente, la salud y la economía circular ya que, muchos de los desechos de alimentos son biopolímeros con potencial aplicación como materiales de pared usados en la encapsulación de compuestos bioactivos (Robert y Morocho, 2018).

## 1. Compuestos bioactivos y la importancia de su protección

La estabilidad de los compuestos bioactivos tales como: polifenoles, flavonoides, carotenoides, ácidos grasos y otros, está relacionada directamente con las condiciones de almacenamiento y procesamiento a la que son expuestos. Factores como la exposición a la luz, actividad de agua, temperatura, presencia de oxidantes o antioxidantes, sulfitos, cambios de pH, presencia de ciertas enzimas, entre otros, favorece la degradación de estos compuestos (Kirca *et al.*, 2007). Cada uno de los compuestos antes mencionados posee estructuras específicas que influyen en los mecanismos, condiciones y procesos de degradación; para su protección se han utilizado varios métodos, entre los que destaca la encapsulación. La degradación de estos compuestos disminuye su valor nutritivo, su coloración y produce una pérdida de sus características sensoriales y funcionales. En general, los compuestos encapsulados son muy diversos. Sin embargo, actualmente el uso de compuestos antioxidantes tales como los polifenoles, carotenos, antocianinas, betalainas, entre otros ha tenido gran relevancia.

Los polifenoles presentes en los frutos poseen propiedades benéficas a la salud, por lo que la suplementación de productos alimenticios con este grupo de compuestos resulta de interés para la industria de alimentos (Massounga Bora *et al.*, 2018). Los polifenoles son metabolitos secundarios que se clasifican de acuerdo con el grupo funcional que incluyen grupos hydroxyl, metil, glucosil y otros (Munin y Edwards-Lévy, 2011) y aunque en las plantas son muy estables en forma de extractos

son altamente sensibles a la luz, pH, altas temperaturas y a la oxidación. Desafortunadamente, su uso se ha limitado por su sensibilidad a factores ambientales, aunado a que en medios alcalinos presentan degradación oxidativa, lo que incrementa la probabilidad de oxidación durante los procesos digestivos. Se ha demostrado en sistemas modelos que los extractos ricos en polifenoles protegen contra la exposición persistente de contaminantes (Choi *et al.*, 2020).

Los carotenoides son un grupo de compuestos isoprenoides que de acuerdo con su estructura se clasifican en carotenos y xantofilas, estos se encuentran en forma natural en diversos productos vegetales, pero son vulnerables a la luz, calor y oxígeno al que son expuestos durante su procesamiento y almacenamiento (Parker, 1996). En general, la degradación de compuestos carotenoides se debe fundamentalmente a las reacciones de oxidación, provocadas por enzimas, como las lipooxigenasas o a reacciones no enzimáticas, las cuales son aceleradas al incrementarse la temperatura, la presencia de metales y de exposición a la luz, por el contrario, son retardadas por la acción de antioxidantes tales como los tocoferoles y las vitaminas (Dhakal y He, 2020). Los carotenoides pueden actuar como antioxidantes a bajas presiones de oxígeno, por esta razón su protección es vital para mantener su funcionalidad. Las temperaturas por encima de 50 °C favorecen las reacciones de degradación y a su vez, la acción de la luz induce a rupturas, formando compuestos incoloros de bajo peso molecular, mientras que el pH provoca isomerización, reagrupamiento y desesterificación de las reacciones (Meléndez Martínez *et al.*, 2004).

Otros compuestos antioxidantes, son las antocianinas, las cuales pertenecen al grupo de polifenoles, y que dependiendo del pH del medio y de la posición de glicosilación imparten color rojo, morado o azul. El mecanismo de degradación irreversible de las antocianinas por calor es debido a la apertura del catión flavylium, seguido por la conversión a la forma chalcona, la cual es incolora (Jiang *et al.*, 2019). Los seres humanos no pueden sintetizar los carotenoides, así que deben ser ingeridos a través de la dieta o de la suplementación. Estos compuestos contribuyen en beneficio de la salud, ya que poseen una alta actividad antioxidante y actúan a través de diversos mecanismos, produciendo diferentes efectos positivos en la salud, por ejemplo, los carotenoides en forma de provitamina A, luteína o zeaxantina benefician la salud ocular. También mejoran la función cognitiva y la salud cardiovascular, además de prevenir algunos tipos de cáncer (Eggersdorfer y Wyss, 2018).

Las betalainas son un conjunto de pigmentos presentes en las frutas, tales como el betabel y la tuna, que contienen betacianinas y betaxantinas que son las que proporcionan el color púrpura y el color amarillo-naranja respectivamente. En las betacianinas, el ácido betalámico está unido al grupo 3,4-dihidroxifenilalanina (DOPA), que puede estar o no glicosilado, mientras que las betaxantinas están unidas con aminoácidos o derivados aminos. Se ha observado que los factores que influyen en la estabilidad de las betalainas son: temperatura, pH, actividad de agua, luz, concentración de oxígeno, presencia de metales, y la acción enzimática, siendo la temperatura el factor más determinante en la degradación de las betalainas (Herbach *et al.*, 2006). Las principales vías de degradación que se han descrito son: isomerización, descarboxilación, desglicosilación, deshidrogenación e hidrólisis en la que ambas estructuras químicas modifican su estructura y sus propiedades (Khan, 2016). Las betalainas poseen actividad antioxidante que se ha relacionado con sus propiedades farmacológicas, tales como actividad antimicrobiana, anticancerígena, antilipídica, antiinflamatorias, entre otras (Gengatharan *et al.*, 2015).

Los ácidos grasos omega 3, 6, 9 y 11, son considerados un importante ingrediente funcional para mantener la salud del corazón, cerebro y sistema nervioso (Barclay *et al.*, 1994). Sin embargo, la

oxidación de éstos no sólo produce olores desagradables, sino que además se forman compuestos potencialmente tóxicos, tales como el malondialdehído y los productos de la oxidación del colesterol, que pueden ser dañinos para la salud. Algunas investigaciones mostraron que los polifenoles junto con ácidos grasos poliinsaturados y otros factores mejoraron el funcionamiento del sistema inmune (Margină *et al.*, 2020).

Las vitaminas son compuestos químicos reactivos con múltiples propiedades funcionales, pero en general son altamente sensibles a la luz, pH, temperatura y al oxígeno, lo que ocasiona una pérdida de su actividad biológica (Dhakal y He, 2020). El ácido ascórbico es un nutriente con actividad antioxidante y propiedades reductoras, que es aplicado como inhibidor del oscurecimiento enzimático en diversos productos alimenticios. La degradación de este ácido es influenciada por diversos factores ambientales mediante procesos oxidativos que producen pérdida de lactona y de su valor nutricional. Se ha reconocido que las vitaminas son compuestos orgánicos indispensables y necesarias para el buen funcionamiento del organismo, cuyas deficiencias desencadenan múltiples enfermedades (Fennema, 2007).

El reto de incorporar compuestos bioactivos que puedan suministrarse en el organismo es mantener su estabilidad desde su almacenamiento hasta su consumo (Mani-Lopez *et al.*, 2017), aunado a que estos deben de mantener una concentración adecuada y una ingesta diaria recomendada, para poder ejercer un efecto deseado en la salud (FAO/WHO, 2001).

## 2. Materiales de pared y agentes emulsificantes

La selección del agente protector adecuado es uno de los factores principales para la protección exitosa de compuestos bioactivos. Desde el punto de vista de la salud y la seguridad, estos agentes protectores deben ser aprobados como materiales “generalmente reconocidos como seguros” (GRAS) para su aplicación en los alimentos (Robin y Sankhla, 2013). Dependiendo de la sustancia a proteger y de las características deseadas del producto final, el material de pared debe ser seleccionado, dentro de una amplia variedad de biopolímeros (Ré, 1998) y debe de poseer, capacidad de protección para los compuestos bioactivos, bajo diferentes condiciones de procesamiento y almacenamiento, sin que estos biopolímeros reaccionen o se modifiquen. Además, deben soportar las condiciones ácidas y enzimáticas del estómago, incrementando la capacidad de adherencia y los tiempos de residencia de los compuestos bioactivos en los sitios diana y en el tracto gastrointestinal.

Los biopolímeros deben tener buenas propiedades emulsificantes y reológicas, ser buenos formadores de película, tener una baja viscosidad a altas concentraciones, permitir una liberación controlada del compuesto bioactivo al ser reconstituido, buena sensación en el paladar, tener bajo costo y, una vida útil y propiedades funcionales adecuadas (Reineccius, 1989; Desai y Park, 2005; Gharsallaoui *et al.*, 2007). Debido a que casi ningún material de pared puede tener todas las propiedades mencionadas, en la práctica se utilizan en forma combinada.

La *TABLA 1* muestra los biopolímeros más utilizados para proteger los compuestos bioactivos, así como su clasificación de acuerdo con su origen, éstos provienen de árboles, plantas, semillas, algas y también pueden ser de origen microbiano y animal. Los biopolímeros utilizados para la protección de compuestos con actividad biológica también pueden ser clasificados de acuerdo con su contenido en carbohidratos, proteínas y a la combinación de ambos. La selección de los agentes de pared por lo general se ha hecho a prueba y error, con los materiales que presentan las propiedades que describimos anteriormente y que funcionan como emulsionantes y encapsulantes, para lo cual se invierte

tiempo y recursos económicos en la realización de pruebas comparativas. Para la determinación de la eficiencia en la protección de sustancias bioactivas, se reportó un método cuantitativo, con base en el cálculo de las energías de activación, considerando que la difusividad efectiva media sigue una relación tipo Arrhenius, lo que permitió seleccionar al material más adecuado para microencapsular y proteger a las sustancias activas contra la oxidación (Pérez-Alonso *et al.*, 2003).

Tabla 1. Fuente de los biopolímeros más comunes.

|            |                                  |                                            |
|------------|----------------------------------|--------------------------------------------|
| Botánica   | Plantas                          | Celulosa, almidón, pectina.                |
|            | Exudados                         | Gomas: arábica, karaya, ghatti, tragacanto |
|            | Semillas                         | Gomas: guar, tara, tamarindo.              |
|            | Tubérculos                       | Konjac mannan                              |
| Algas      | Algas rojas                      | Agar, carragenina                          |
|            | Algas cafés                      | Alginato                                   |
| Microbiano | <i>Xanthomonas campestris</i>    | Goma de xantana.                           |
|            | <i>Leuconostoc mesenteroides</i> | Dextrinas                                  |
|            | Otros                            | Curdlan, goma de gellan, celulosa          |
| Animal     | Tejido conectivo                 | Gelatina                                   |
|            | Leche                            | Caseinato, proteína de suero de leche.     |
|            | Caparazones de crustáceos        | Quitosano                                  |

Modificado de: Zuidam y Nedovic (2010)

## 2.1 Carbohidratos

Biopolímeros como almidones, maltodextrinas, polisacáridos solubles de soya, dextrinas, pectinas, alginatos, carragenina y ciclodextrinas son considerados como buenos agentes protectores de compuestos bioactivos, ya que exhiben buena solubilidad en agua y baja viscosidad a altos contenidos de sólidos, pero no son tan eficientes en comparación con las gomas y proteínas que tienen buenas propiedades interfaciales (Gharsallaoui *et al.*, 2007), sin embargo, los carbohidratos protectores tienen buenas propiedades gelificantes que estabilizan las emulsiones contra la floculación y coalescencia (Dalglish, 2006). Una ventaja que presentan los almidones es que su balance hidrofílico-lipofílico (HLB) puede ser modificado, alterando su estructura química a través de procesos químicos como la acetilación, hidrolización parcial, oxidación y modificación catiónica con el uso de sales de amonio. La modificación también reporta una mejor estabilidad a la degradación térmica y menor tendencia a la retrogradación y sinéresis (Kaur *et al.*, 2012). Otro producto a considerar es el quitosano, que es soluble en medios acuosos ácidos a  $\text{pH(s)} < 6$ , el cual se ha reportado como material de pared para encapsular limoneno y vitamina C (Borgognoni *et al.*, 2006; Pulido y Beristain, 2010).

## 2.2 Gomas

Las gomas son biopolímeros de alto peso molecular secretado por algunos organismos vivos de origen botánico y microbiano. Las principales gomas utilizadas en la protección de ingredientes bioactivos son la goma de acacia, karaya, ghatti, tragacanto, guar, tara, tamarindo y xantana. De manera general, estos biopolímeros presentan buena solubilidad en agua, algunos poseen capacidad para formar geles y todos son sensibles a la presencia de iones debido a su naturaleza polielectrolítica (Williams, 2019). De todas las gomas, la arábica y de mezquite poseen excelentes propiedades emulsificantes debido a que contienen una fracción proteica en su estructura, lo que hace que sus emulsiones sean estables con la mayoría de moléculas hidrofóbicas en un amplio intervalo de pH (Beristain y Vernon-Carter, 2007).

## 2.3 Proteínas

Las proteínas son moléculas anfifílicas que tienen grupos polares y no polares en sus superficies, lo que les provee gran capacidad emulsionante, propiedades para formar películas y contra reacciones de oxidación, lo cual las hace ser recomendadas como buenos vehículos de compuestos bioactivos (Reineccius, 1989; Gharsallaoui *et al.*, 2007). Las proteínas más utilizadas para la protección de estas moléculas son la gelatina, caseína, gliadina y proteínas de suero de leche y de soya. Para funcionar adecuadamente como agente emulsionante, la proteína debe tener un equilibrio de sus grupos polares y no polares en su superficie, de forma que produzca una buena solubilidad en agua y una buena actividad superficial. Si la superficie de la proteína es demasiado no polar, no se disolverá en agua, pero si es muy polar, no tendrá actividad superficial (McClements y Jafari, 2018). Su microestructura puede ser globular o flexible, lo que afecta sus propiedades interfaciales y por lo tanto el grado de protección brindado al compuesto bioactivo. Las propiedades eléctricas de las proteínas dependen del pH y están relacionadas con su estabilidad química y física para ser funcionales en los sistemas dispersos.

# 3. Sistemas de protección y selección de agentes protectores

En el punto anterior se describieron los diferentes materiales protectores que existen, en este apartado solo se abordan los de origen vegetal, usados en los sistemas líquidos y sólidos. Se debe realizar una selección cuidadosa para escoger los agentes más apropiados para obtener una mejor funcionalidad.

## 3.1 Sistemas líquidos

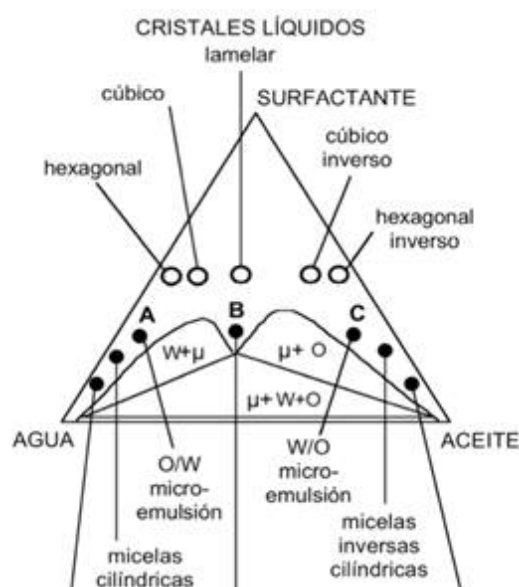
En estos sistemas se usan agentes protectores de coloides y agentes emulsionantes que protegen a sustancias bioactivas solubles en agua y en aceite respectivamente. Los protectores de coloides tienen peso molecular alto, no forman micelas y por lo general presentan alta viscosidad. Los agentes emulsionantes protegen a las sustancias bioactivas solubles en aceite o agua, tienen como función adsorberse en la interface provocando la disminución de la tensión superficial entre el agua y el aceite, formando gotas y protegiendo a la sustancia bioactiva (Han *et al.*, 2018). En general los sistemas dispersos se clasifican de acuerdo al tamaño de partícula, como es el caso de las emulsiones convencionales y las nanoemulsiones que se elaboran a través de la aplicación de alta energía usando equipos de homogeneización rotor/estator, generadores de ultrasonido y homogeneizadores de alta presión (Anton *et al.*, 2008).



Las nanoemulsiones se consideran como aquellas que tienen tamaño de partícula menores a 200 nm y las emulsiones convencionales por arriba de este valor (Huang *et al.*, 2010). En contraste con los sistemas dispersos anteriores, que requieren de la aplicación de energía para su elaboración, se encuentran los que se forman por compatibilidad energética de sus componentes, ya que solo requieren baja o nula energía externa para su fabricación. Estos sistemas utilizan la energía química intrínseca del sistema, inducida por cambios de concentración (PIC) y/o de temperatura (PIT), por emulsificación espontánea (EE) y Pickering (McClements, 2011) y los límites máximos y mínimos de formación para cada sistema, dependerán de las condiciones del proceso como temperatura y agitación (Gutiérrez *et al.*, 2008). Los principales sistemas formulados a partir de estos métodos de baja energía y utilizando biopolímeros, son los cristales líquidos y emulsiones pickering. Este tipo de sistemas, han confirmado tener una alta biocompatibilidad a consecuencia de sus constituyentes (Xu *et al.*, 2020), también cuentan con la capacidad para retener y proteger altas concentraciones del compuesto con actividad biológica. Se han reportado trabajos en los que se elaboraron cristales líquidos, utilizando como estabilizador el quitosano y ácido málico; en estos trabajos se ha concluido que los cristales líquidos cuentan con propiedades fisicoquímicas que les permiten ser utilizados como liberadores de fármacos y moléculas bioactivas de manera controlada sobre tejidos “target o específicos” para ejercer su función terapéutica a consecuencia de su compatibilidad estructural (Chang *et al.*, 2007; Lisboa, 2017). En el caso de las emulsiones formuladas por pickering, han adquirido un especial interés por tener la capacidad de proteger altas concentraciones de moléculas lipofílicas e hidrofílicas, además sus características estructurales les confieren cambios reversibles e irreversibles deseables *in situ* en función de cambios de temperatura, pH y/o cizalla; la estabilización y características de estos sistemas se ha logrado mediante el uso de almidones modificados, lactoglobulinas, proteínas de soya, ovoalbúminas, zeína, caseína, entre otras (Dai *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Peng y Tang, 2020; Xu *et al.*, 2020).

Para un sistema ternario en particular, el comportamiento de fase entre aceite, agua y surfactante se ha representado en los diagramas de fases ternarios (Lawrence y Rees, 2012) y se pueden observar las diferentes microestructuras posibles en la FIGURA 1, tales como, microemulsiones normales y en fase reversa, cristales líquidos lamelares, hexagonales y cúbicos con sus respectivas fases inversas.

Figura 1. Diagrama de fases de Agua-Aceite-Surfactante (FIRP), modificado de Salager, (2015)



Los materiales utilizados para formar las emulsiones generalmente son los agentes surfactantes y los biopolímeros. En el caso de los agentes surfactantes, su asociación depende principalmente de su polaridad y geometría molecular (Ng y Rogers, 2018), en este caso particular solo nos ocuparemos de los biopolímeros, siendo los principales proteínas y polisacáridos que son los que se utilizan para los sistemas alimentarios. Estos materiales son una fuente importante de energía y de nutrientes que proporcionan un valor agregado a los compuestos bioactivos que se desean proteger en comparación con los agentes surfactantes que se utilizan como emulsificantes. La selección del biopolímero más apropiado para una aplicación particular es la parte más importante en la formación y elaboración de una emulsión. Para lo cual se debe considerar las características moleculares ya que influyen directamente en las propiedades funcionales. Los biopolímeros contienen un gran número de monómeros, generalmente van de 20 a 20 000, los cuales pueden adoptar un gran número de configuraciones, sin embargo, en la práctica adoptan aquella que tiene menor energía libre de acuerdo con el medio ambiente en que se encuentre. Muchas de las propiedades funcionales dependen de su interacción con el agua, las cuales se presentan cuando el biopolímero está completamente disuelto y distribuido en la fase acuosa.

Los biopolímeros que tienen un número de grupos polares y no polares se asocian en la interfaz aceite-agua, orientándose los grupos hidrofóbicos en la fase oleosa y los hidrofílicos en el agua reduciendo el área de contacto entre el agua y aceite, formando una membrana interfacial, que es la que está presente en todas las emulsiones. Dependiendo de las características e interacciones de la membrana con las fases es el tipo de emulsión que se forma y la estabilidad que tiene.

### 3.2 Sistemas sólidos

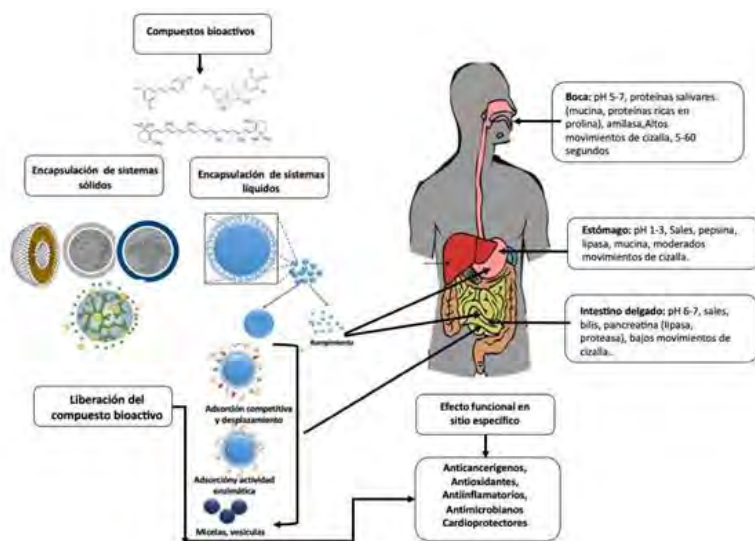
En estos sistemas también se busca proteger al compuesto bioactivo, solamente que en este caso el compuesto es protegido por un sólido que actúa como una barrera funcional entre el núcleo y el ambiente para evitar reacciones químicas y físicas y mantener las propiedades biológicas, funcionales y fisicoquímicas de los materiales del núcleo (Bakry *et al.*, 2016), estos sólidos son por lo general amorfos y en muy pocas ocasiones cristalinos, en donde el material bioactivo se encuentra embebido o ligado al material de pared. La eficiencia de encapsulación depende de factores como la concentración y solubilidad del polímero en el disolvente, la velocidad de eliminación del disolvente, el método de microencapsulación elegido, etc. (Jyothi Sri *et al.*, 2012). Los agentes protectores deberán tener en lo general la siguientes propiedades: no deben ser reactivos con el compuesto que se desea proteger, tener sabor neutro, bajo costo, alta solubilidad en agua, formar soluciones de baja viscosidad incluso en altas concentraciones (Ergönül, 2018), tener buenas propiedades de emulsificación, proporcionar buena estabilidad y proteger el material de su núcleo principalmente de factores como humedad, oxígeno y luz (Aksoylu y Günç Ergönül, 2017). Por otra parte, para la selección del método de encapsulación adecuado es importante tomar en cuenta los siguientes parámetros: tamaño deseado de las partículas, características físico-químicas de los materiales del núcleo y de las paredes, aplicación del material encapsulado, sistema de liberación de las cápsulas, capacidad de producción comercial y costo (Ergönül, 2018). Los métodos de microencapsulación se dividen en 3 grandes grupos: 1) métodos físicos: secado por aspersión, liofilización, precipitación por fluidos supercríticos y evaporación de solventes, 2) métodos fisicoquímicos: coacervación, liposomas y gelación iónica, finalmente, 3) métodos químicos: polimerización interfacial y la complejación de inclusión molecular (Ozkan *et al.*, 2019).

## 4. Aplicación de sistemas dispersos y su evaluación en pruebas *in vitro* e *in vivo*

La biodisponibilidad de los sistemas dispersos es afectada por condiciones ambientales y fisiológicas y la efectividad de su liberación en el sitio de entrega se ha evaluado mediante diferentes ensayos *in vitro* e *in vivo*. Las pruebas gástricas simuladas incluyen generalmente la fase oral, gástrica e intestinal y presentan ventajas en costo, tiempo y reproducibilidad (Zhang *et al.*, 2020). Una vez que los sistemas de protección de compuestos bioactivos son consumidos, existen cambios apreciables en sus propiedades interfaciales que parecen influenciar su biodisponibilidad (Golding y Wooster, 2010). La competencia por el área en la interfase entre los biopolímeros está relacionada con la diferencia en su capacidad de cambiar su conformación durante el proceso de adsorción. Por ejemplo, las proteínas flexibles, cambian su conformación más fácilmente que las proteínas globulares por lo que las desplazan de la interfase. Esta diferencia de comportamiento en la superficie depende de la viscosidad interfacial de corte, la cual está en orden de  $10^{-3}$  Pa\*s para proteínas flexibles y para proteínas globulares está en orden de 1 Pa\*s, lo que implica interacciones laterales más fuertes entre las moléculas adsorbidas (Graham y Phillips, 1979; Bos y Van Vliet, 2001).

El desplazamiento de moléculas anfifílicas adsorbidas en la interfase es crucial para el diseño de sistemas de liberación que transporten moléculas bioactivas dentro del cuerpo humano, ya que los emulsificadores localizados originalmente en la interfase de la superficie de las gotas compiten por el área disponible con las moléculas con superficie activa que originalmente se encuentran en otros alimentos o en el cuerpo humano (ácidos grasos libres, fosfolípidos, proteínas), lo que da como resultado un cambio en la estructura interfacial que influye su biodisponibilidad. En la FIGURA 2 se aprecian los posibles cambios de sistemas de protección sólidos y líquidos al pasar a través del tracto gastrointestinal. Es importante estudiar las características fisicoquímicas de la interfase tales como actividad superficial, cantidad adsorbida y desorbida, espesor, estructura, topografía, velocidad y capacidad para disminuir la tensión interfacial, la posibilidad de cambiar su conformación durante y después de la adsorción y las interacciones entre las moléculas de la interfase son importantes para mejorar la velocidad de absorción y biodisponibilidad de sustancias bioactivas en el cuerpo humano.

Figura 2. Cambios de los sistemas sólidos y líquidos al pasar a través del sistema gastrointestinal. Modificado de Singh *et al.*, (2009)



Uno de los grandes retos que se enfrenta hoy en día es la validación de pruebas *in vitro* que permitan predecir el comportamiento y eficacia de un compuesto bioactivo dentro del cuerpo humano. A la fecha existen algunos autores que consideran que un estudio *in vitro* proporciona información valiosa pero no concluyente, ya que no se toma en cuenta el aspecto toxicocinético, que abarca: transporte, acumulación, biotransformación y eliminación del compuesto de interés en el organismo; además del aspecto toxicodinámico, es decir, de interacción con otras sustancias, moléculas, células y receptores, los cuales en conjunto pueden modificar la respuesta toxicológica final (Carlson y Morrison, 2009). Además, existe una tendencia a reducir las pruebas *in vivo* y se han publicado normas que establecen que no se realizarán ensayos con animales a menos que los ensayos *in vitro* proporcionen información suficiente sobre la biocompatibilidad de los materiales de prueba (International Organization for Standardization, 2004). En este sentido resulta importante mencionar algunas de estas técnicas que se han utilizado en la protección y liberación de compuestos bioactivos. La protección de sustancias puede tener diferentes objetivos dependiendo del área de aplicación: farmacéutica, textil, cosmética, médica o alimenticia. Se ha demostrado que estas técnicas de protección mejoran el tiempo de retención de nutrientes, permiten una liberación controlada de los ingredientes, mantienen la estabilidad de los compuestos bioactivos durante el almacenamiento y procesamiento, previenen interacciones indeseables con la matriz del alimento, disminuyen o inhiben ciertas reacciones de degradación de los compuestos encapsulados, tales como la oxidación o hidrólisis, enmascaran sabores desagradables e incrementan la biodisponibilidad, mientras mantienen la funcionalidad de los componentes (Gupta *et al.*, 2014). Todos los compuestos bioactivos descritos con anterioridad han demostrado tener un efecto en la prevención de diversas enfermedades en estudios llevados a cabo *in vitro*. Sin embargo, solo podrán ser efectivos si alcanzan sitios específicos, tejidos y las células donde han de ejercer su acción (Bao *et al.*, 2019), por lo tanto la predicción del comportamiento bajo determinadas condiciones permitirá evitar la pérdida de su estabilidad fisicoquímica y actividad biológica, además de suponer o estimar las condiciones ideales de almacenamiento para proteger a estos compuestos de las condiciones indeseables y mantener sus atributos. En este aspecto, se han reportado una serie de experimentos *in vitro*, ya que en algunas ocasiones, la exposición a factores ambientales de los compuestos bioactivos se traducen en una pérdida de estabilidad durante el procesamiento y almacenamiento. En este mismo sentido, hay una serie de pruebas de caracterización de estos sistemas sólidos y líquidos que ayudan a predecir sus propiedades, que están resumidas en la TABLA 2. Este tipo de pruebas están determinadas por la información que se requiere para su aplicación. Dentro de estas se pueden mencionar, la evaluación de las propiedades de flujo (densidad real, compactada, índice de hausner, porcentaje de compresibilidad, ángulo de reposo), propiedades de reconstitución (índice de solubilidad, índice de rehidratación, dispersabilidad), estabilidad del compuesto protegido (actividad antioxidante, cuantificación de principio activo, estabilidad oxidativa), propiedades fisicoquímicas, reológicas, calorimétricas y mecánicas, entre otras. Otro tipo de pruebas *in vitro* consisten en la evaluación de las cápsulas en condiciones gastrointestinales simuladas, pruebas con cultivos celulares y tejidos en las que se determinan la permeabilidad y capacidad de liberación de las sustancias encapsuladas (Acosta, 2008). Es necesario considerar que la liberación de los compuestos está controlada por el biopolímero usado como protector, la técnica para proteger utilizada y las condiciones del medio de liberación (Augustin *et al.*, 2014). Además, de que la liberación del principio activo se realiza en un medio acuoso, con ayuda de la temperatura, esfuerzo de cizalla y diferentes tipos de reacción químicas o enzimáticas en el organismo. La difusión y la erosión son dos de los mecanismos fundamentales de la liberación. La difusión está determinada por la disolución del compuesto y se relaciona con la porosidad de los sistemas, mientras que la erosión depende de las propiedades del medio en el que se encuentran dichos sistemas causando un desgaste de la geometría de la molécula con una consecuente disminución de tamaño (de Vos *et al.*, 2009).

Tabla 2. Principales pruebas de caracterización de sistemas de protección

| Pruebas                                                                    | Sistemas líquidos                                | Sistemas sólidos                     |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Estabilidad del compuesto protegido                                        | ✓ Actividad antioxidante                         | ✓ Actividad antioxidante             |
|                                                                            | ✓ Cuantificación de principio activo             | ✓ Cuantificación de principio activo |
|                                                                            | ✓ Estabilidad oxidativa                          | ✓ Estabilidad oxidativa              |
|                                                                            | ✓ Rendimiento                                    | ✓ Rendimiento                        |
|                                                                            | ✓ Eficiencia                                     | ✓ Eficiencia                         |
| Rendimiento                                                                | ✓                                                | ✓                                    |
| Tamaño de partícula                                                        | ✓                                                | ✓                                    |
| Distribución de tamaño de partícula                                        | ✓                                                | ✓                                    |
| Propiedades eléctricas                                                     | ✓                                                | ✓                                    |
| Forma y morfología superficial                                             | ✓                                                | ✓                                    |
| Propiedades de flujo                                                       | ✓ Ángulo de contacto<br>✓ Cinéticas de adsorción | ✓ Densidad real                      |
|                                                                            |                                                  | ✓ Densidad compactada                |
|                                                                            |                                                  | ✓ Índice de hausner                  |
|                                                                            |                                                  | ✓ Porcentaje de compresibilidad      |
|                                                                            |                                                  | ✓ Ángulo de reposo                   |
| Propiedades de reconstitución                                              | -                                                | ✓ Índice de solubilidad              |
|                                                                            |                                                  | ✓ Índice de rehidratación            |
|                                                                            |                                                  | ✓ Dispersabilidad                    |
| Propiedades mecánicas                                                      | -                                                | ✓                                    |
| Propiedades reológicas                                                     | ✓                                                | ✓                                    |
| Tensión superficial e interfacial                                          | ✓                                                | -                                    |
| Propiedades calorimétricas                                                 | ✓                                                | ✓                                    |
| Estudios de liberación en el sistema gastrointestinal y cultivos celulares | ✓                                                | ✓                                    |

Por otro lado, la administración de sistemas bioactivos protegidos representa una forma de acarrear diversas sustancias terapéuticas, por lo que se debe considerar la su versatilidad para liberarse en sitios determinados, lo cual depende de parámetros físicos y de las condiciones y características fisiológicas del sitio de liberación (Aisida *et al.*, 2020). La biodisponibilidad puede ser evaluada mediante estudios *in vivo*, utilizando modelos de animales en los que estos sistemas son sometidos a modelos de análisis que permiten estimar la concentración, velocidad y funcionalidad con la que el ingrediente bioactivo se libera y tiene su efectividad en el lugar de acción. Es por tanto esencial conocer su metabolismo en el organismo humano mediante estudios de su biodisponibilidad *in vivo*, ya que estos estudios proporcionan información que ayuda a entender los efectos fisiológicos de la absorción de los compuestos liberados, así que la investigación de estudios *in vivo* resulta imprescindible para una mejor interpretación de resultados.

## 5. Conclusión

El aprovechamiento de los recursos naturales se ha enfocado en mejorar la salud, lo cual contribuye a la economía circular del país, ya que existe una gran diversidad de recursos cuyo potencial como material encapsulante no ha sido investigado. La estabilidad de diversos compuestos bioactivos depende de la selección del material protector o de su combinación. De acuerdo a lo estudiado hasta ahora se observa que es necesario realizar más estudios *in vitro* que permitan una mejor correlación con los estudios *in vivo*, para poder disminuir el uso de animales y la optimización de los recursos. La composición, espesor y comportamiento reológico de la membrana interfacial en los sistemas líquidos tienen una función importante en la cinética de degradación de los compuestos bioactivos durante el procesamiento, almacenamiento y después de su consumo. Mientras que en los sistemas sólidos, la estructura y composición del material de pared influyen en la permeabilidad del oxígeno, de lo cual depende la estabilidad de la sustancia a proteger.



## 6. Referencias

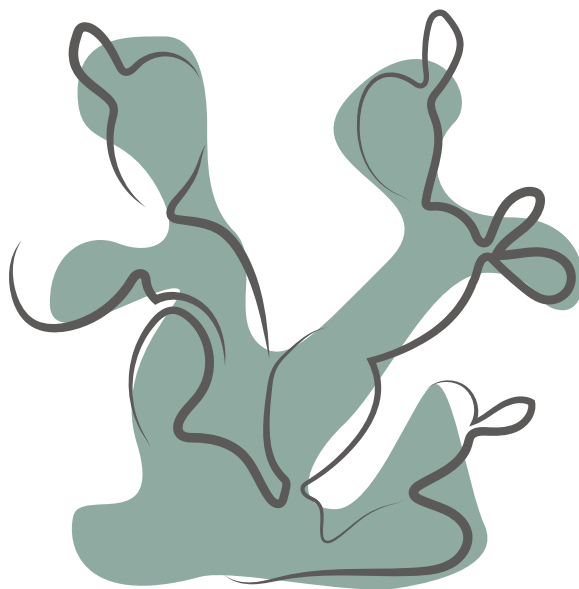
- Acosta, E. (2008). Testing the effectiveness of nutrient delivery systems, En: *Delivery and Controlled Release of Bioactives in Foods and Nutraceuticals* (N. Garti), Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. <https://doi.org/10.1533/9781845694210.1.53>
- Aisida, S.O., Akpa, P.A., Ahmad, I., Zhao, T. kai, Maza, M. y Ezema, F.I. (2020). Bio-inspired encapsulation and functionalization of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *European Polymers Journal* 12(5), 109371. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109371>
- Aksoylu, Z. y Günç Ergönül, P. (2017). A Review on Encapsulation of Oils. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilim. Derg.* <https://doi.org/10.18466/cbayarfb.313358>
- Anton, N., Benoit, J.P. y Saulnier, P. (2008). Design and production of nanoparticles formulated from nano-emulsion templates-A review. *Journal of Control Release* 128, 185–199. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2008.02.007>
- Augustin, M.A., Sanguansri, L., Rusli, J.K., Shen, Z., Cheng, L.J., Keogh, J. y Clifton, P. (2014). Digestion of microencapsulated oil powders: In vitro lipolysis and in vivo absorption from a food matrix. *Food & Function* 5(11), 2905-2912. <https://doi.org/10.1039/c4fo00743c>
- Bakry, A.M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M.Y., Mousa, A. y Liang, L. (2016). Microencapsulation of Oils: A Comprehensive Review of Benefits, Techniques, and Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15(1), 143-182. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12179>
- Bao, C., Jiang, P., Chai, J., Jiang, Y., Li, D., Bao, W., Liu, Bingxue, Liu, Bin, Norde, W. y Li, Y. (2019). The delivery of sensitive food bioactive ingredients: Absorption mechanisms, influencing factors, encapsulation techniques and evaluation models. *Food Research International* 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.02.024>
- Barclay, W.R., Meager, K.M. y Abril, J.R. (1994). Heterotrophic production of long chain omega-3 fatty acids utilizing algae and algae-like microorganisms. *Journal of Applied Phycology* 6, 123-129. <https://doi.org/10.1007/BF02186066>
- Borgognoni, C.F., Polakiewicz, B. y Pitombo, R.N.D.M. (2006). Stability of d-limonene emulsions in modified chitosan. *Food Science and Technology* 26(3), 502-508. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612006000300003>
- Bos, M.A. y Van Vliet, T. (2001). Interfacial rheological properties of adsorbed protein layers and surfactants: A review. *Advances in Colloid and Interface Science* 91(3), 437-471. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00077-4](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00077-4)
- Carlson, M.D.A., Morrison, R.S. (2009). Study design, precision, and validity in observational studies. *Journal of Palliative Medicine* 12(1), 77-82. <https://doi.org/10.1089/jpm.2008.9690>
- Chang, J.S., Chang, K.L.B. y Tsai, M.L. (2007). Liquid-crystalline behavior of chitosan in malic acid. *Journal of Applied Polymer Science* 105(5), 2670-2675. <https://doi.org/10.1002/app.26475>
- Choi, B.S.Y., Varin, T.V., St-Pierre, P., Pilon, G., Tremblay, A. y Marette, A. (2020). A polyphenol-rich cranberry extract protects against endogenous exposure to persistent organic pollutants during weight loss in mice. *Food Chemistry* 111832. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111832>
- Dai, H., Li, Y., Ma, L., Yu, Y., Zhu, H., Wang, H., Liu, T., Feng, X., Tang, M., Hu, W. y Zhang, Y. (2020). Fabrication of cross-linked  $\beta$ -lactoglobulin nanoparticles as effective stabilizers for Pickering high internal phase emulsions. *Food Hydrocolloids* 109. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106151>
- Dalglish, D.G. (2006). Food emulsions - Their structures and structure-forming properties. *Food Hydrocolloids* 20(4), 415-422. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.10.009>
- de Vos, P., Bučko, M., Gemeiner, P., Navrátil, M., Švitel, J., Faas, M., Strand, B.L., Skjak-Braek, G., Morch, Y.A., Vikartovská, A., Lacík, I., Kolláriková, G., Orive, G., Poncelet, D., Pedraz, J.L. y Ansorge-Schumacher, M.B. (2009). Multiscale requirements for bioencapsulation in medicine and biotechnology. *Biomaterials* 30(13), 2559-2570. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.01.014>
- Desai, K.G.H. y Park, H.J. (2005). Preparation and characterization of drug-loaded chitosan-tripolyphosphate microspheres by spray drying. *Drug Development Research*, 64(2), 114-128. <https://doi.org/10.1002/ddr.10416>

- Dhakal, S.P. y He, J. (2020). Microencapsulation of vitamins in food applications to prevent losses in processing and storage: A review. *Food Research International* 137, 109326. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109326>
- Eggersdorfer, M. y Wyss, A. (2018). Carotenoids in human nutrition and health. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 652, 18-26. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2018.06.001>
- Ergönül, P.G. (2018). Influence of wall material composition on microencapsulation efficiency of cold pressed pumpkin seed oil by freeze-drying. *Novel Techniques in Nutrition and Food Science* 3, 235-238. <https://doi.org/10.31031/ntnf.2018.03.000555>
- Fennema's Food Chemistry, Fourth Edition (2007). Fennema's Food Chemistry, Fourth Edition. <https://doi.org/10.1201/9781420020526>
- Gengatharan, A., Dykes, G.A. y Choo, W.S. (2015). Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. *LWT-Food Science and Technology* 64(2), 645-649. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.052>
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A. y Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International* 40(9), 1107-1121. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>
- Golding, M. y Wooster, T.J. (2010). The influence of emulsion structure and stability on lipid digestion. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 15 (1-2), 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.11.006>
- Graham, D. y Phillips, M. (1979). Proteins at liquid interfaces: I. Kinetics of adsorption and surface denaturation. *Journal of Colloid and Interface Science* 70(3), 403-414. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(79\)90050-x](https://doi.org/10.1016/0021-9797(79)90050-x)
- Gupta, M.K., Prakash, D. y Mishra, B. (2014). A Novel Biodegradable microparticulated drug delivery system: An Review. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences* 3(8), 1535-1563.
- Gutiérrez, J.M., González, C., Maestro, A., Solè, I., Pey, C.M. y Nolla, J. (2008). Nano-emulsions: New applications and optimization of their preparation. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 13(4), 245-251. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2008.01.005>
- Han, S.W., Song, H.Y., Moon, T.W. y Choi, S.J. (2018). Influence of emulsion interfacial membrane characteristics on Ostwald ripening in a model emulsion. *Food Chemistry* 242, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.018>
- Herbach, K.M., Stintzing, F.C. y Carle, R. (2006). Betalain stability and degradation - Structural and chromatic aspects. *Journal of Food Science* 71(4), R41-R50. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00022.x>
- Huang, Q., Yu, H. y Ru, Q. (2010). Bioavailability and delivery of nutraceuticals using nanotechnology. *Journal of Food Science* 75(1), R50-R57. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01457.x>
- International Organization for Standardization (2004). Biological evaluation of medical devices - Part 2: Animal Welfare Requirements. ISO 10993-2.
- Jiang, T., Mao, Y., Sui, L., Yang, N., Li, S., Zhu, Z., Wang, C., Yin, S., He, J. y He, Y. (2019). Degradation of anthocyanins and polymeric color formation during heat treatment of purple sweet potato extract at different pH. *Food Chemistry* 274, 460-470. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.141>
- Jyothi Sri, S., Seethadevi, A., Suria Prabha, K., Muthuprasanna, P., Pavitra, P. (2012). Microencapsulation: A review. *International Journal of Pharma and Bio Science* 509-531
- Kaur, B., Ariffin, F., Bhat, R., Karim, A.A. (2012). Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids* 26(2), 398-404. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.016>
- Khan, M.I. (2016). Stabilization of betalains: A review. *Food Chemistry* 197, 1280-1285. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.043>
- Kirca, A., Özkan, M. y Cemeroglu, B. (2007). Effects of temperature, solid content and pH on the stability of black carrot anthocyanins. *Food Chemistry* 101(1), 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.01.019>
- Lawrence, M.J. y Rees, G.D. (2012). Microemulsion-based media as novel drug delivery systems. *Advanced Drug Delivery Reviews* 45(1), 89-121. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.018>
- Lisboa, H.M. (2017). Morphological and rheological characterization of chitosan liquid-crystalline solutions and gels. *Materials Science* 53960728. <https://doi.org/10.15406/mseij.2017.01.00007>
- Liu, Y., Yan, C., Chen, J., Wang, Y., Liang, R., Zou, L., McClements, D.J. y Liu, W. (2020). Enhancement of

- beta-carotene stability by encapsulation in high internal phase emulsions stabilized by modified starch and tannic acid. *Food Hydrocolloids* 109, 106083. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106083>
- Margină, D., Ungurianu, A., Purdel, C., Nițulescu, G.M., Tsoukalas, D., Sarandi, E., Thanasoula, M., Burykina, T.I., Tekos, F., Buha, A., Nikitovic, D., Kouretas, D. y Tsatsakis, A.M. (2020). Analysis of the intricate effects of polyunsaturated fatty acids and polyphenols on inflammatory pathways in health and disease. *Food Chemistry Toxicology*, 143, 111558. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111558>
- Massounga Bora, A.F., Ma, S., Li, X. y Liu, L. (2018). Application of microencapsulation for the safe delivery of green tea polyphenols in food systems: Review and recent advances. *Food Research International* 105, 241-249. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.047>
- McClements, D.J. (2011). Edible nanoemulsions: Fabrication, properties, and functional performance. *Soft Matter* 7, 2297-2316. <https://doi.org/10.1039/c0sm00549e>
- McClements, D.J. y Jafari, S.M. (2018). Improving emulsion formation, stability and performance using mixed emulsifiers: A review. *Advances in Colloid and Interface Science* 251, 55-79. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.12.001>
- Meléndez Martínez, A., Vicario, I. y Heredia, F. (2004). Importancia nutricional de los pigmentos carotenoides. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 52(2), 149-155.
- Munin, A. y Edwards-Lévy, F. (2011). Encapsulation of natural polyphenolic compounds; a review. *Pharmaceutics* 3(4), 793-829. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics3040793>
- Ng, N. y Rogers, M.A. (2018). Surfactants, in: *Encyclopedia of Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21598-9>
- Ozkan, G., Franco, P., De Marco, I., Xiao, J. y Capanoglu, E. (2019). A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications. *Food Chemistry* 272, 494-506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.205>
- Parker, R.S. (1996). Carotenoids 4: absorption, metabolism, and transport of carotenoids. *FASEB Journal*. 10(5), 542-551. <https://doi.org/10.1096/fasebj.10.5.8621054>
- Peng, L.P. y Tang, C.H. (2020). Outstanding antioxidant pickering high internal phase emulsions by co-assembled polyphenol-soy  $\beta$ -conglycinin nanoparticles. *Food Research International* 136, 109509. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109509>
- Pérez-Alonso, C., Báez-González, J.G., Beristain, C.I., Vernon-Carter, E.J. y Vizcarra-Mendoza, M.G. (2003). Estimation of the activation energy of carbohydrate polymers blends as selection criteria for their use as wall material for spray-dried microcapsules. *Carbohydrate Polymers* 53, 197-203. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00052-3)
- Pulido, A. y Beristain, C.I. (2010). Encapsulación de ácido ascórbico mediante secado por aspersión, utilizando quitosano como material de pared. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 9(2), 189-195.
- Ré, M.I. (1998). Microencapsulation by spray drying. *Drying Technology* 16(6), 1195-1236.
- Reineccius, G.A. (1989). Flavor encapsulation. *Food Reviews International* 147-176. <https://doi.org/10.1080/87559128909540848>
- Roberto, F. y Morocho, A. (2018). The Circular Economy as a Sustainable Development Factor of the Productive Sector. *INNOVA Research Journal* 3(12), 78-98.
- Robin, A.L. y Sankhla, D. (2013). CHAPTER 4. European Legislative Framework Controlling the Use of Food Additives, in: *Essential Guide to Food Additives*. <https://doi.org/10.1039/9781849734981-00044>
- Salager, J.L. (2015). Formulación de microemulsiones por el método del HLD. *Cuad. FIRP* S211-T.
- Singh, H., Ye, A. y Horne, D. (2009). Structuring food emulsions in the gastrointestinal tract to modify lipid digestion. *Progress in Lipid Research* 48(2), 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2008.12.001>
- Vernon-Carter y Beristain C.I. (2007). Utilization of Mesquite (*Prosopis juliflora*) gum as an emulsion stabilizing agent for spray dried. *Drying Technology* 12(7), 1727-1733.
- Williams, P.A. (2019). Gums and stabilisers. *Food Hydrocolloids* 86, 1-210. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.046>
- Xu, Y.T., Yang, T., Liu, L.L. y Tang, C.H. (2020). One-step fabrication of multifunctional high internal phase pickering emulsion gels solely stabilized by a softer globular protein nanoparticle: S-Ovalbumin. *Journal of Colloid and Interface Science* 580, 515-527. 580. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.054>

Zhang, R., Belwal, T., Li, L., Lin, X., Xu, Y. y Luo, Z. (2020). Recent advances in polysaccharides stabilized emulsions for encapsulation and delivery of bioactive food ingredients: A review. *Carbohydrate Polymers* 242, 116388. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116388>

Zuidam, N.J. y Nedović, V.A. (2010). Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing. *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1008-0>



## Potencial Uso de Flor de Cempasúchil (*Tagetes erecta*) en la Industria de Alimentos

Rascón-Díaz, Martha Paola<sup>1</sup>

Leal-Cerdán, Martín Alfonso<sup>1</sup>

Bonilla-Zavaleta, Enrique<sup>1</sup>

Beristain-Guevara, César Ignacio<sup>2</sup>

Pascual-Pineda, Luz Alicia<sup>2</sup>

Jiménez-Fernández, Maribel<sup>2\*</sup>

<sup>(1)</sup> Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Orizaba, México.

<sup>(2)</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana, Xalapa, México.

\* Correspondencia

M.J.F. ORCID 0000-0001-5437-3812,  
maribjimenez@uv.mx; Tel. 2288418900

Desde tiempos ancestrales, en México, la flor de cempasúchil se utiliza primordialmente, como flor ornamental en la celebración del día de muertos. Ésta se caracteriza por ser rica en compuestos bioactivos que poseen actividad antioxidante, por lo que se ha usado como alimento humano y animal, además se ha demostrado que posee actividad terapéutica y farmacológica. Dentro de los compuestos bioactivos que contiene destacan los flavonoides, taninos, saponinas, polifenoles y carotenoides siendo la luteína uno de los más relevantes. Se ha reportado su uso como colorante natural y su incorporación en diversos productos alimenticios. En la presente propuesta se hace una revisión bibliográfica de la producción de la flor en México, cuáles son las regiones con mayor producción en este país. Se presenta información sobre los principales compuestos bioactivos y las propiedades funcionales que posee. Se discuten los métodos de extracción de estos compuestos y de su oleorresina. Se presenta una recopilación de las principales aplicaciones en diferentes áreas y finalmente se presentan propuestas sobre su potencial aplicación en el área de alimentos.

**Palabras clave:** Antioxidante, carotenos, colorante, flor de cempasúchil, luteína.





## Introducción

En México la producción de flor de cempasúchil (*Tagetes erecta*) está limitada principalmente a su uso ornamental, sin existir un control y distribución adecuado de su producción. Lo que ocasiona que en algunos años se presente de acuerdo con las condiciones climáticas, desabasto del producto y en otros una sobreproducción, lo que resulta en pérdidas económicas para los productores. La economía circular es una alternativa que podría ayudar a diversificar y redefinir el uso de los residuos de la planta *Tagetes erecta*, favoreciendo el modelo circular creando capital económico, natural y social además de ayudar en la protección del medio ambiente y

combatir el efecto del cambio climático, produciendo beneficios para la sociedad, cambiando las percepciones de los consumidores y haciendo coincidir el exceso de la oferta con la demanda (Zink *et al.*, 2017). Se ha reportado que la flor de cempasúchil, únicamente se utiliza para las festividades de día de muertos y en los meses restantes su demanda disminuye significativamente, por lo que la flor de cempasúchil tiene gran potencial para ser usada en otras áreas y el aprovechamiento de los subproductos de la flor beneficiaría a la economía local sin afectar la preservación de la especie como parte de la cultura del pueblo mexicano (Barajas *et al.*, 2020). Es importante enfatizar que, de acuerdo con esto, se necesita reducir la dependencia económica de la producción de este cultivo a las costumbres y tradiciones, y considerar en rediseñar y diversificar el uso de la flor. Por lo que con base en lo anterior y considerando los principios activos que posee, se pueden plantear estrategias de uso asociadas a las propiedades de dichos compuestos con la finalidad de establecer una economía sostenible que incentive a la producción del cultivo. Esta revisión permitirá mostrar alternativas para el uso de los residuos de la planta *Tagetes erecta* en la obtención de compuestos con propiedades antimicrobianas, antioxidantes y antiproliferativas, entre otras, permitirá la revalorización de este cultivo y sus residuos, favoreciendo su incorporación a la cadena de producción y la generación de productos de valor agregado.

## 1. Producción de flor de cempasúchil en México

La flor de cempasúchil es originaria de América Latina, se utiliza primordialmente como planta ornamental en la celebración del día de muertos. Debido a su amplia capacidad de adaptación es cultivada en huertos, milpas, y zonas rurales, donde el cultivo se realiza principalmente a cielo abierto en zonas de climas cálido, semicálidos y templados con un rango de altitudes que van desde los 8 hasta los 3900 metros sobre el nivel del mar (Piccaglia *et al.*, 1998). A pesar de que esta flor es endémica de México y América latina, en el 2019 se reportó que China fue el principal productor, mientras que el segundo lugar lo ocupó India y en tercer lugar se encuentra Perú (Hernández, 2019). En México, la producción asciende alrededor de 15,000 toneladas anuales, distribuida en los estados de Puebla, Guerrero, Hidalgo, Oaxaca, San Luis Potosí, Tlaxcala, Morelos y Durango, principalmente en las que el cultivo asciende a unas 1,900 hectáreas (El economista, 2018); siendo el estado de Puebla el principal productor con alrededor del 76.6 % de producción en relación con el volumen nacional (Mena, 2018). Al ser un cultivo a cielo abierto y principalmente de temporada, el volumen de cultivo depende de las condiciones climáticas y el precio de la tonelada oscila entre los 2,900 - 3,300 pesos por tonelada, dependiendo de la calidad y las fechas de ventas (Mena, 2018). Además de la



producción en campo y en invernadero, actualmente el cultivo de la flor de cempasúchil se lleva a cabo en producción en maceta para ventas, lo cual ha ido incrementándose en forma notoria a partir del 2001 con un aumento en el número de macetas de 10,000 a cerca de 5,000,000 (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas, 2017). En el 2019, la flor de cempasúchil registró una siembra de 2 mil 561 hectáreas, con una unidad de medida a nivel nacional de nueve mil 574 gruesas, 505 mil 865 manojos, dos millones 278 mil plantas y 21 mil 380 toneladas, produciendo una derrama económica tan solo en el estado de México de 111 millones de pesos (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019).

## 2. Composición de flor de cempasúchil

Numerosos autores han reportado los compuestos presentes en las flores de *Tagetes erecta*, su composición determina su uso y aplicación y ayuda a explicar las propiedades que confiere. Las flores de *Tagetes erecta* contienen aceites esenciales, resinas, materia colorante amarilla, taninos, pigmentos no polares, polisacáridos, saponinas, glicósidos, esteroides, leucoantocianinas, entre otros (Vásquez, 2008). La pigmentación amarilla se debe a la presencia de provitamina A, carotenos y flavonoides (Shetty *et al.*, 2015). Camacho *et al.*, (2019) reportaron una concentración de 7.32 mg/mL de carbohidratos solubles totales, 0.86 mg/mL de azúcares reductores y 1.48 mg/mL de proteínas solubles totales en extractos etanólicos de flores de *Tagetes erecta*. En otro estudio, se sometió la flor de *Tagetes erecta* a un proceso de extracción y purificación, y se identificaron mediante técnicas de <sup>1</sup>H RMN, 22 compuestos, ellos son:  $\beta$ -sitosterol,  $\beta$ -daucosterol,  $7\beta$ -hidroxisitosterol, lupeol, eritrodiol, eritrodiol-3-palmitato, 1-[5'-(1-propin-1-il)-[2,2'-bitofen]-5-il]-etanona,  $\alpha$ -terthienil, quercetagetina, quercetagetina-7-metil éter, quercetagetin-7-O-glucósido, kaempferol, ácido siríngico, ácido gálico, Ácido, 3- $\alpha$ -galactosil-disírico, 3- $\beta$ -galactosil-ácido disírico, 6-etoxi-2,4-dimetilquinolina, oplodiol, (3*S*, 6*R*, 7*E*)-hidroxi-4,7-megastigmadien-9-ona, palmitina, etilenglicol linoleato, y *n*-hexadecano (Xu *et al.*, 2011). Adicionalmente, se ha reportado que las flores de *Tagetes erecta* contienen aceites esenciales, y se han identificado veinte compuestos en los aceites esenciales, que constituyen el 96.50 % del aceite total. Laosinwattana *et al.* (2018) encontraron en cantidades relativamente más altas las moléculas de la clase de la monoterpina y consistieron principalmente en piperitona (17.12 %), piperitenona (10.46 %) y ocimina (8.59 %); mientras que las moléculas de clase sesquiterpenoides consistían principalmente en neoftadieno (16.18 %) y cariofileno (11.10 %).

Por otra parte, se han determinado alrededor de 35 compuestos volátiles presentes en el extracto de flor de *Tagetes erecta* obtenido mediante una extracción simultánea de destilación por arrastre de vapor, los compuestos que se encuentran con mayor abundancia relativa son el *cis*-ocimeno (28.35 %) y el *cis* y *trans*-*Tagetona* (54.57 %) (Wells *et al.*, 1993).

Los compuestos bioactivos de la flor de cempasúchil son generalmente obtenidos mediante un proceso de prensado, deshidratación y molienda, posteriormente se realiza una extracción utilizando solventes afines al compuesto a extraer y se obtiene una oleorresina. El producto obtenido es saponificado para liberar las xantofilas. Esta flor es un buen recurso de polifenoles y luteína, ya que contiene aproximadamente 80-90 % de luteína y de 5-15 % de carotenoides dentro de los que se encuentra la zeaxantina, violaxantina y criptozantina (Fu *et al.*, 2018). Todos estos compuestos poseen actividad antioxidante, antibacterial, antiobesidad, antiinflamatoria y anticancerígena, por lo que se han aplicado en la industria de alimentos, cosmética y farmacéutica como excelentes antioxidantes (Borutinskaitė *et al.*, 2017). La luteína es un pigmento que actúa absorbiendo la alta energía de la luz azul, por lo que es efectiva en la reducción del daño de la degeneración macular, además de exhibir

actividad antiproliferativa (Castro *et al.*, 2017). Este pigmento puede ser purificado de la oleoresina y mezclado con aceite, silicato de calcio y gelatina, el cual es usado como aditivo colorante en la preparación de pan, jugos, galletas, pastas, aceites, mantequillas y margarinas, entre otros (Tapia *et al.*, 2008). La luteína es una xantofila (carotenoide que contiene oxígeno) de fórmula  $C_{40}H_{56}O_2$ , se caracteriza también por la presencia de un grupo hidroxilo en ambos extremos de la molécula, lo que la diferencia de otros carotenoides (Harrison y Curley, 2016). La luteína es un carotenoide no provitamina A, es decir, no se puede convertir en vitamina A (Beltrán *et al.*, 2012). El nombre de luteína proviene del latín *luteus* (amarillo), un pigmento amarillo-naranja de la familia de los carotenoides que está presente en la yema de huevo, flor de cempasúchil, maíz y en los vegetales de hoja verde. Se trata de un compuesto liposoluble que se forma en las plantas y se concentra mayoritariamente en las hojas, donde actúa como filtro y protege a las células de la influencia dañina de la luz. La luteína no es biosintetizada por el organismo humano por lo que debe ser obtenida de los alimentos o suplementos vitamínicos (Corral, 2011). Se afirma que la única fuente de origen animal de luteína y zeaxantina es la yema de huevo, en la que se encuentran en concentraciones elevadas, además de constituir una matriz lipídica que optimiza la biodisponibilidad de dichas sustancias.

Por otra parte, la flor de cempasúchil es una de las fuentes con mayor concentración de luteína (12 g/kg del total de las xantofilas, 80-90 % de luteína) usada como suplemento en la nutrición animal. La composición de la flor de cempasúchil es importante para la utilización del extracto en suplementos nutricionales y se ha demostrado que incrementa su valor como colorante en la alimentación de aves debido a su contenido de compuestos biológicamente útiles como la luteína (Abdel *et al.*, 2017). Varios estudios toxicológicos han demostrado que las formulaciones de luteína no inducen ninguna mutación ni genotoxicidad. Además, no se observó toxicidad relacionada con el embarazo o el desarrollo a dosis de hasta 200 mg/kg de peso corporal por día (Madaan *et al.*, 2017).

Sin embargo, la biodisponibilidad de la luteína es muy pobre (aproximadamente 10-15 %) y extremadamente variable debido a su baja solubilidad acuosa interna, y depende totalmente de la naturaleza del solvente o vehículo (Surai *et al.*, 2000). La alta lipofilia del esqueleto de carbono C40 de la luteína, lo hace ligeramente soluble en fluidos digestivos y, por lo tanto, la luteína tiene una absorción oral deficiente (Kotake y Nagao, 2011). Aunque la vía exacta para la absorción de la luteína todavía no se comprende completamente, una hipótesis es que la luteína se emulsiona en pequeñas gotas de lípidos o vesículas en el estómago y luego se convierte en micelas mixtas por la acción de las sales y fosfolípidos biliares, después de lo cual estas micelas mixtas son absorbidas por los enterocitos. La liberación de luteína al tejido hepático adicional se realiza a través de la interacción de las moléculas de lipoproteína y luego la luteína llega a la retina del ojo a través de la lipoproteína de alta densidad (HDL) (Madaan *et al.*, 2017).

Este carotenoide está presente en todo el cuerpo humano y principalmente es acumulado en el punto de la retina llamado mácula lútea, en el cual la percepción visual es más aguda. Esta zona es rica en ácidos grasos poliinsaturados que son atacados por los radicales libres y sufren un proceso de oxidación debido a la incidencia de la luz (Ma y Lin, 2010). El papel de la luteína es la filtración de la luz azul y funciona como un antioxidante. Su funcionamiento se hace presente a medida que aumentan los niveles en la mácula del ojo, produciendo una disminución significativa en la cantidad de rayos de luz dañinos que llegan a las células de la retina que producen la visión, lo que se traduce en un menor riesgo de degeneración macular, cataratas y una menor pérdida de visión en los ancianos. La luteína actúa además como antioxidante al eliminar los radicales libres o apagar el oxígeno, lo que disminuye el estrés oxidativo en la retina (Eisenhauer *et al.*, 2017), también se ha mostrado que la

luteína tiene propiedades antimutagénicas, antitumorales, antiinflamatorias y preventivas contra la aterosclerosis y juega un papel importante en la industria alimentaria siendo ampliamente utilizada como colorante natural y aditivo alimentario, y en la industria cosmética como antioxidante y protector solar (Zou *et al.*, 2011; Ranganathan *et al.*, 2016).

La ingesta diaria recomendable de luteína es 6 mg/día (Perry *et al.*, 2009). A pesar de sus grandes propiedades funcionales, la luteína presenta al igual que la mayoría de los carotenoides, sensibilidad a factores como temperatura, luz y pH (Lin y Chen, 2005; Gutiérrez, 2018). Sin embargo, existen técnicas de micro y nanoencapsulación utilizadas ampliamente para la protección de compuestos bioactivos. Particularmente la nanoencapsulación presenta innumerables aplicaciones en el procesamiento de alimentos debido al aumento de la demanda de la producción de alimentos funcionales con mayor valor nutricional, dosis más bajas de conservadores sintéticos y mejores características sensoriales.

La flor de cempasúchil contiene además astaxantina, la cual se extrae mediante procesamiento industrial de las flores para ser utilizada como nutracéutico o suplemento balanceado utilizado en avicultura (Del Villar *et al.*, 2007) y podrían constituir también una alternativa acuicultural en caso de definirse su utilidad como agentes pigmentantes. La oleorresina de cempasúchil es sin duda alguna la mejor alternativa en la sustitución de colorantes sintéticos por colorantes naturales.

### 3. Métodos de extracción de oleorresinas y compuestos de interés de flor de *Tagetes erecta*

Existen varios factores del proceso de extracción y procesamiento que afectan los componentes y propiedades de la flor de *Tagetes erecta* (TABLA 1). La eficacia de la extracción de xantofilas depende del tratamiento previo dado a la flor para aumentar la permeabilidad de la pared celular y facilitar los mecanismos de difusión de intercambio de masa entre fases inmiscibles durante el proceso de lixiviación (Navarrete-Bolaños *et al.*, 2005). El pigmento de la flor de cempasúchil se extrae generalmente con solventes orgánicos, pero este método reporta pérdidas del 50 %, por lo que se han probado pretratamientos enzimáticos con celulosas que han demostrado incrementar los rendimientos de extracción y eliminar el uso de solventes orgánicos (Delgado y Paredes, 1997). El tratamiento enzimático resulta ser una mejor opción para incrementar el rendimiento de extracción de xantofilas en comparación con el tratamiento con hexano (Navarrete-Bolaños *et al.*, 2005).

Sin embargo, otros métodos se han probado para mejorar la eficiencia de extracción, en un estudio se encontró que el secado combinado de radiación infrarroja y aire caliente por convección previo a la extracción por lixiviación con metanol afectaron en menor medida el contenido de ácidos fenólicos, preservaron el color, las propiedades antioxidantes y los compuestos bioactivos presentes en la flor de cempasúchil en comparación con el secado de aire caliente y liofilización (Siriamornpun *et al.*, 2012). Así mismo, en otro estudio se encontró que la extracción supercrítica con agua de flor de *Tagetes erecta* produjo una mayor concentración de polifenoles totales (116 mg GAE/g s.s.), flavonoides (135.64 mg RE/g) y una mayor actividad antioxidante (2.42 mmol TE/g) que la extracción por lixiviación con diferentes solventes, en la que los autores reportaron valores de 10.94 - 96.66 mg GAE/g, 12.78 - 127.54 mg RE/g y 0.14 - 1.69 mmol TE/g s.s., para polifenoles totales, flavonoides y actividad antioxidante respectivamente (Xu *et al.*, 2015).

Adicionalmente, el uso de ultrasonido es un método recientemente estudiado para la extracción de compuestos de la flor de *Tagetes erecta*, se ha reportado que el ultrasonido acelera la velocidad de extracción de los compuestos bioactivos incrementando sus propiedades antimicrobianas y funcionales. En un estudio realizado por Kazibwe *et al.*, (2017), se comparó el contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante de extractos acuosos de *Tagetes erecta* obtenidos por lixiviación y métodos ultrasónicos, los autores reportaron un contenido de fenoles totales de 130, 165 y 220 mg GAE/g s.s., así como una actividad antioxidante de 75, 105 y 144  $\mu\text{mol TE/g s.s.}$  en extractos acuosos de *Tagetes erecta* obtenidos por extracción con agua caliente, extracción ultrasónica en baño de agua y extracción ultrasónica ultrarrápida respectivamente. A su vez, la extracción asistida por microondas representa un proceso alternativo para la extracción de compuestos bioactivos de la flor de cempasúchil. Fu *et al.*, (2018) compararon el rendimiento de la extracción por lixiviación, la extracción asistida por microondas y la extracción enzimática de la flor de *Tagetes erecta*, en este estudio se encontró que con la combinación de los métodos de extracción asistida por microondas y extracción enzimática se obtuvo el mayor rendimiento (85 mg/g) y que la extracción por soxhlet presentó el rendimiento más bajo (32 mg/g).

Además de las condiciones de extracción, algunas técnicas del procesamiento y almacenamiento afectan la estabilidad de los compuestos bioactivos presentes en la flor de cempasúchil. La exposición de la flor a la radiación UV y altas temperaturas produce una disminución del contenido de xantofilas totales (luteína y zeaxantina) con respecto a las flores cultivadas bajo sombra (Evangelista *et al.*, 2011). Se ha reportado que el proceso de encapsulación por secado por aspersión de luteína obtenida de flor de cempasúchil usando diferentes materiales de pared (octenilsuccinato, almidones, sacarosa, goma, arábica, maltodextrina y gelatina) mejora la estabilidad de la luteína durante el almacenamiento (Li *et al.*, 2015; Pal y Bhattacharjee, 2018). También se ha reportado que la composición de la emulsión y el pH determinan la estabilidad del color de la oleoresina de flor de cempasúchil emulsificada y que la mezcla de biopolímeros produce un efecto sinérgico sobre la estabilidad fisicoquímica de las emulsiones de flor de cempasúchil (Vernon *et al.*, 1996).

Tabla 1. Efecto del procesamiento sobre los componentes de la flor de cempasúchil

| Método de extracción y/o proceso | Condiciones                                                                      | Resultados                                                                                             | Referencias                       |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Microondas y enzimas             |                                                                                  | Las microondas mejoraron el rendimiento de extracción.                                                 | Fu <i>et al.</i> , 2018           |
| Ultrasonido                      | Ultrasonido en medio acuoso                                                      | Aceleró la extracción de compuestos bioactivos de la flor.                                             | Kazibwe <i>et al.</i> , 2017      |
| Extracción supercrítica          | Extracción supercrítica de polifenoles                                           | Duplicó la concentración de quercetagenin.                                                             | Xu <i>et al.</i> , 2015.          |
| Secado                           |                                                                                  | El uso de radiación infrarroja y aire caliente por convección afecta menos las propiedades de la flor. | Siriamornpun <i>et al.</i> , 2012 |
| Disolventes y Secado             | Acetona en agitación por 30 min. Aire seco seguido de una extracción con acetona | El 90 % de las xantofilas de las flores fueron retenidas.                                              | Deineka <i>et al.</i> , 2007      |

|                            |                                      |                                                                 |                                        |
|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Extracción con disolventes | Extracción con hexano                | El rendimiento de extracción depende del pretratamiento.        | Navarrete-Bolaños <i>et al.</i> , 2005 |
| Enzimas                    | Enzima ECONASE-CEP                   | Incrementó el rendimiento de extracción.                        | Delgado y Paredes-López, 1997.         |
| Emulsificación             | Goma arábica /Mezquite, pH 3, 5 y 7. | La mezcla de biopolímeros mejora la estabilidad de la emulsión. | Vernon <i>et al.</i> , 1996            |

#### 4. Usos y aplicaciones de la flor de cempasúchil

En México, el principal uso que se le da a la flor de cempasúchil es como adorno popular en las tumbas y ofrendas del día de los muertos celebrados durante los días 1 y 2 de noviembre. Aunado a esto, otro uso de las flores es cocinarlas e incorporarlas a varios platillos tradicionales, como atoles, sauces o moles en los cuales imparten una coloración y sabor especial (Mulík y Ozuna, 2020). Además, la flor de cempasúchil ha sido empleada para padecimientos digestivos (dolor de estómago, empacho, diarrea, cólicos e indigestión y para eliminar parásitos intestinales); para afecciones respiratorias (como la gripa y el congestionamiento nasal); en afecciones de la piel (como sarpullidos, llagas y verrugas); en problemas gineco obstétricos (inflamación del vientre, cólicos menstruales); en alteraciones nerviosas (como el insomnio, los nervios, la epilepsia) y en enfermedades culturales (como el espanto, el mal aire y el susto) (Zolla y Argueta, 2009).

Los conocimientos y usos anteriores son tradicionales de distintas regiones, y en su mayoría empíricos, y han mostrado con base en la experiencia y en la observación, que la flor de cempasúchil tiene un gran campo de aplicación en distintas áreas y puede ser de aprovechamiento en la sociedad actual y en futuras actividades. Por consiguiente, es necesario hacer alusión a los usos y funcionalidades terapéuticas demostradas científicamente. La *TABLA 2* presenta las aplicaciones más relevantes y la actividad encontrada de la flor de cempasúchil que ayudará a visualizar las distintas propiedades benéficas que tiene la flor *Tagetes erecta*.

El uso de flor de cempasúchil como aditivo, antioxidante o colorante adicionado a diversos alimentos para consumo animal tales como: aves, peces, crustáceos y otros, ha demostrado que puede producir efectos benéficos como ganancia de peso, sobrevivencia, resistencia a enfermedades y eficacia en pigmentación, entre otros. Se encontró que la suplementación de 80 ppm de flor de cempasúchil a la dieta de los pollos de engorda produjo una pigmentación aceptada por el mercado mexicano (Martínez *et al.*, 2004).

En un estudio llevado a cabo por Muñoz *et al.* (2012) se encontró que la pigmentación de la piel de pollo se incrementa al incrementar el tiempo de administración y la concentración de flor en la dieta, y que los animales hembra presentaron mayor grado de pigmentación. De igual manera, en otro estudio se encontró que el grado de la pigmentación amarillo de la piel de tilapia depende de la concentración administrada de extracto de flor de cempasúchil, los factores genéticos de los peces, el estado de desarrollo y el peso (Ponce *et al.*, 2004).

Por otra parte, el color de los alimentos está asociado con las propiedades sensoriales y en muchas ocasiones el color del alimento se traduce en un mejor precio de venta. Por lo que se han reportado muchos trabajos sobre el uso de flor de cempasúchil y sus extractos en pigmentación de alimentos, los pigmentos de la flor de cempasúchil han sido utilizados ampliamente como colorantes en muchos productos alimenticios como pollo y pescado, entre otros. A nivel industrial, se destaca el uso de



la flor de cempasúchil para la obtención de colorantes, a partir de los carotenoides presentes en las flores. En el mundo gastronómico, se emplea para hacer guisos como crema de flor de cempasúchil, pollo en salsa de cempasúchil, y hasta postres, como helado de cempasúchil.

Adicionalmente, se ha reportado que la inclusión de flor de cempasúchil y sus extractos mejora la incorporación de compuestos carotenoides a la dieta humana. La mayoría de los compuestos presentes en la flor de cempasúchil son considerados antioxidantes, lo que se ha demostrado en diversos estudios realizados en los extractos y en el aceite esencial. *Tagetes erecta* exhibió un alto contenido de compuestos fenólicos y actividad antioxidante contra radicales libres ABTS+ y DPPH (Xu *et al.*, 2015). Los resultados de un estudio llevado a cabo por Bashir y Gilani (2008) indican claramente la presencia de una actividad antioxidante significativa en extracto crudo de *Tagetes erecta* contra varios sistemas oxidativos *in vitro*, además el extracto demostró una inhibición significativa de los retorcimientos inducidos por ácido acético en ratones albinos suizos, mostrando un posible efecto analgésico en sistemas *in vivo*.

Por otro lado, el extracto hidroalcohólico de las flores de *Tagetes erecta* atenuó la pérdida de peso, el índice de actividad de enfermedades e incrementó la mucina en el colon en un modelo animal de colitis ulcerosa (Meurer *et al.*, 2019). Adicionalmente, se ha demostrado en pruebas *in vivo* que el extracto de flores atenúa la secreción de citocinas inflamatorias y reducción de migración celular inflamatoria en el colon y que sus carotenoides son excelentes antioxidantes que inhiben algunos tipos de cáncer evaluados con mutagenicidad de 1-nitropireno (Mejía *et al.*, 1997).

La flor de cempasúchil también se ha utilizado en el biocontrol de hongos patógenos de cultivos de hortalizas, en los que se encontró que una concentración de 1 g/L obtuvo un porcentaje de inhibición superior a 65 % (Pupo *et al.*, 2007). En un estudio llevado a cabo por Kazibwe *et al.* (2017) se encontró que extractos de raíz, tallo, hoja y flor de *Tagetes erecta* poseen actividad antibacteriana contra *Streptococcus mutans* y que los extractos de flor poseen además actividad antibacteriana contra *Pseudomonas aeruginosa*. Adicionalmente, se ha comprobado que nanopartículas de plata cubiertas de *T. erecta* poseen un potente efecto antimicrobiano en oposición a *E. coli* y *S. aureus*. En otro estudio se aisló un flavonoide de flores frescas de *Tagetes erecta* mediante extracción y fraccionamiento con diferentes solventes, este flavonoide fue identificado como patuletina y se comprobó que posee actividad antibacteriana contra *Alcaligenes faecalis*, *Bacillus cereus*, *Campylobacter coli*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus vulgaris*, *Streptococcus mutans* y *Streptococcus pyogenes*.

Además de los usos en alimentos, también se han planteado aplicaciones como colorante, insecticida y antifúngico en la industria textil. Se ha evaluado la capacidad de la flor de cempasúchil para conferir protección contra los rayos UV en materias textiles y se han obtenido buenos resultados (Shabbir *et al.*, 2018).

En el ámbito agrícola, la flor de cempasúchil presenta piretrinas y tiofenos, que son las sustancias vegetales responsables de los efectos contra insectos (Serrato, 2014), por lo que se reconoce como una planta ideal para la rotación de cultivos y así disminuir la densidad poblacional de nematodos y de los géneros *Meloidogyne* y *Pratylenchus*, que constituyen problemas serios en muchas zonas agrícolas (Méndez, 2009). Además, se pueden aplicar extractos acuosos y polvos de diferentes partes de la planta (raíces, tallos y hojas, flores o toda la planta) para repeler o matar insectos en cultivos o para granos almacenados. Se ha demostrado que los extractos y



compuestos volátiles presentes en la flor de cempasúchil poseen actividad biocida en larvas y mosquitos adultos (Wells *et al.*, 1993; Nikkon *et al.*, 2009). También se evaluó el potencial de plantas de *Tagetes erecta* L. en fitorremediación de suelo contaminado con cadmio, plomo y zinc y se encontró que la absorción total de metales pesados por la planta aumentó con el aumento de la concentración de metales pesados en el suelo (Madanan *et al.*, 2021; Minisha *et al.*, 2020).

Tabla 2. Usos generalizados en investigaciones científicas  
de la flor de cempasúchil (*Tagetes erecta* L)

| Propiedad                    | Modelo                                                | Actividad                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Referencia                         |
|------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Colorante                    | Pollo                                                 | Incremento en la pigmentación de la piel de pollo.                                                                                                                                                                                                                                                     | Muñoz <i>et al.</i> , 2012         |
|                              | Aditivos en alimentos de camarón                      | Mejoría en la coloración de camarones.                                                                                                                                                                                                                                                                 | Tapia <i>et al.</i> , 2008         |
|                              | Pigmentación de tilapia                               | Efecto de la concentración de carotenoides en pigmentación de piel de tilapia.                                                                                                                                                                                                                         | Ponce <i>et al.</i> , 2004         |
| Antioxidante y analgésica    | <i>In vitro</i> y ratones albinos                     | Probaron el poder antioxidante de los extractos <i>in vitro</i> , y la actividad analgésica en la zona abdominal provocada por ácido acético en modelos <i>in vivo</i> .                                                                                                                               | Bashir y Gilani, 2008              |
| Antiinflamatoria             | <i>In vivo</i> , ratones                              | Atenuación de secreción de citocinas inflamatorias y reducción de migración celular inflamatoria en el colon.                                                                                                                                                                                          | Meurer <i>et al.</i> , 2019        |
| Anticancerígena              | <i>Salmonella typhimurium</i> tester strain YG1024    | Pigmentos de flor de cempasúchil inhibieron antimutagenicidad de 1-nitropireno.                                                                                                                                                                                                                        | Mejía <i>et al.</i> , 1997         |
| Antitumoral                  | Células Hela                                          | Extractos de <i>Tagetes erecta</i> no estimulan la proliferación de células hela y tienen actividad quimioprotectora, induciendo muerte por apoptosis en bajo porcentaje.                                                                                                                              | Rivera, 2012                       |
| Antifúngica                  | Hortalizas                                            | Se obtuvieron altos porcentajes de inhibición.                                                                                                                                                                                                                                                         | Pupo <i>et al.</i> , 2007          |
| Antimicrobiana               | Cepas bacterianas                                     | Actividad antibacteriana de nanopartículas de plata cubiertas de <i>T. erecta</i> contra <i>Escherichia coli</i> y <i>Staphylococcus aureus</i> .                                                                                                                                                      | Maji <i>et al.</i> , 2020          |
|                              | Cepas bacterianas                                     | Actividad antibacteriana de extractos de <i>Tagetes erecta</i> contra <i>Streptococcus mutans</i> y <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .                                                                                                                                                                    | Kazibwe <i>et al.</i> , 2017       |
|                              | Cepas bacterianas                                     | Posee efecto antibacteriano contra <i>Alcaligenes faecalis</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Campylobacter coli</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Proteus vulgaris</i> , <i>Streptococcus mutans</i> y <i>Streptococcus pyogenes</i> . | Rhama y Madhavan, 2011             |
| Protección de radiaciones UV | Tela de lana teñida con extracto de flor de caléndula | Mayor capacidad de protección UV para materias textiles.                                                                                                                                                                                                                                               | Shabbir <i>et al.</i> , 2018       |
| Herbicida                    | Bioensayo de placas de Petri con semillas maduras     | Efecto sobre la germinación y crecimiento de semillas de <i>Echinochloa cruz-galli</i> debido a la inhibición de la actividad de $\alpha$ -amilasa.                                                                                                                                                    | Laosinwattana <i>et al.</i> , 2018 |

|                  |                                     |                                                                                                                                                                                     |                              |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Insecticida      | Larvas de mosquitos adultos         | Alta efectividad para inactivar larvas y mosquitos.                                                                                                                                 | Wells <i>et al.</i> , 1993   |
|                  | Plaga de <i>Tribolium castaneum</i> | Fraciones de solventes combinados con extracto etanólico de <i>Tagetes erecta</i> mostraron tener importantes efectos pesticidas contra larvas y adultos de los modelos estudiados. | Nikkon <i>et al.</i> , 2009  |
| Fitorremediación | Suelo de laterita contaminado       | Eliminación de tres metales pesados, cadmio (Cd), plomo (Pb) y zinc (Zn).                                                                                                           | Madanan <i>et al.</i> , 2021 |
|                  | Suelo                               | Remoción de metales de suelo.                                                                                                                                                       | Minisha <i>et al.</i> , 2020 |

## 5. Conclusiones

Esta revisión presenta evidencia de que la flor de cempasúchil tiene potencial para diversificar su uso, derivado de su exceso en la producción en algunas épocas del año, y las propiedades colorantes, nutricionales, antioxidantes y funcionales que posee. Existen suficientes estudios clínicos que demuestran que además de su uso tradicional ornamental podría tener aplicación en la industria alimentaria y farmacéutica incentivando la economía circular de esta planta. La comercialización de flor de cempasúchil se desarrolla generalmente formando esquemas tradicionales de comercialización, por lo que la información presentada en esta revisión ayudará a identificar las oportunidades de uso de esta flor, sobre todo en épocas de sobreproducción, lo cual podría beneficiar a la economía rural.

**Contribuciones de los autores:** Todos los autores participaron en la conceptualización, investigación y redacción del documento, todos han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

**Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## 6. Referencias

- Abdel, E., Akhtar, H., Chambers, J. y Zaheer, K. (2017). Lutein and Zeaxanthin Carotenoids in Eggs. En *Egg Innovations and Strategies for Improvements*. Academic Press, 199-206.
- Alam, A.U., Couch, J.R. y Creger, C.R. (1968). Petals of Aztec marigold (*Tagetes erecta*) as a source of pigment for avian species. *Journal of Food Science* 33, 635-636.
- Bashir, S., & Gilani, A. H. (2008). Studies on the antioxidant and analgesic activities of Aztec marigold (*Tagetes erecta*) flowers. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 22(12), 1692-1694.
- Barajas, M., Soto, N. I., Escudero, A., Sánchez, F., Hernández, Q. y Bautista, H. (2020). Análisis de la cadena de suministro de la flor de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.); caso de estudio. *AgroProductividad* 13(3), 65-71.
- Beltrán, B., Estévez, R., Cuadrado, C., Jiménez, S., Olmedilla, B. (2012). Base de datos de carotenoides para valoración de la ingesta dietética de carotenos, xantofilas y de vitamina A: utilización en un estudio comparativo del estado nutricional en vitamina A de adultos jóvenes. *Nutrición hospitalaria* 27(4), 1334-1343.
- Borutinskaitė, V., Virkšaitė, A., Gudelytė, G. y Navakas-kienė, R. (2017). Green tea polyphenol EGCG causes anti-cancerous epigenetic modulations in acute promyelocytic leukemia cells. *Leuk. Lymph* 59 (2), 469-478.
- Camacho-Campos, C., Pérez-Hernández, Y., Valdivia-Ávila, A., Ramírez-Pérez, H. L., & Gómez-Brisuela, L. (2019). Propiedades fitoquímicas y antibacterianas de extractos de *Tagetes erecta* L. (Asteraceae). *Revista Cubana de Química*, 31(1), 53-64.
- Castro, C., Ventura, J.M., González, M.D., Rojas, R., Ascacio, J.A., Aguilar, C.N. y Martínez-Ávila, G.C.G. (2017). Impact of extraction techniques on antioxidant capacities and phytochemical composition of polyphenol-rich extracts. *Food Chemistry* 237, 1139-1148.
- Corral, C. (2011). Extracción de luteína a partir de flores de tagete (*Tagetes erecta*) y estabilización por microencapsulación. Tesis de doctorado. Universidad de Santiago de Chile, Chile.
- Deineka, V. I., Sorokopudov, V. N., Deineka, L. A. y Tretyakov, M. Y. (2007). Flowers of marigold (*Tagetes*) species as a source of xanthophylls. *Pharmaceutical Chemistry Journal* 41(10), 540-542.
- Del Villar, A., Serrato, M., Solano, A., Arenas, M., Quintero, A., Sánchez, J., Evangelistas, S., Jimenez, A., García, F. y Vanegas, P. (2007). Carotenoides en *Tagetes erecta* L. la modificación genética como alternativa. *Revista Fitotecnica Mexicana* 30(2), 109-118.
- Delgado, V.F., y Paredes, O. (1997). Effects of enzymatic treatments on carotenoid extraction from marigold flower (*Tagetes erecta*). *Food Chemistry* 58(3), 255-258.
- Eisenhauer, B., Natoli, S., Liew, G. y Flood, V. (2017). Lutein and zeaxanthin—food sources, bioavailability and dietary variety in age-related macular degeneration protection. *Nutrients* 9(2), 120.
- El economista (2018). Sagarpa garantiza abasto de flor de cempasúchil para día de muertos. Disponible en: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Sagarpagarantiza-abasto-deflor-de-cempasuchilpara-Dia-de-Muertos-20181030-0095.html>
- Evangelista, S., Ubaldo, D., Camacho, B.H., Arenas, M.L., Del Villar, A.A., García, F. y Jiménez, A. (2011). Estudio del Desarrollo, calidad de la planta y acumulación de pigmentos de lígulas de *Tagetes erecta* L. expuestas a dos intensidades de luz. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas* 10(5), 476-488.
- Fletcher, D. L., Papa, C. M., y Tirado, F. X. (1986). The effect of saponification on the broiler coloring capability of marigold extracts. *Poultry Science* 65(9), 1708-1714.
- Fu, X.X., Ma, N., Sun, W.P. y Dang, Y.Y. (2018). Microwave and enzyme co-assisted aqueous two-phase extraction of polyphenol and lutein from marigold (*Tagetes erecta* L.) flower. *Industrial Crops and Products* 123, 296-302.
- Giordano, E. y Quadro, L. (2018). Lutein, zeaxanthin and mammalian development: Metabolism, functions and implications for health. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 647, 33-40.
- Gutiérrez, F. (2018). Estudio sobre la susceptibilidad a la isomerización de los carotenoides maculares. Tesis de master de agroalimentación. Universidad de Sevilla, España.

- Harrison, E. y Curley, R. (2016). Carotenoids and retinoids: nomenclature, chemistry, and analysis. In *The Biochemistry of Retinoid Signaling* 81(1), 1-19.
- Hernández, S. (2019). China lidera producción de cempasúchil, destrona a México. Michoacán, México: El sol de México. Disponible en: <https://www.elsolde-mexico.com.mx/méxico/sociedad/china-lidera-produccion-de-cempasuchil-destrona-a-mexico-dia-de-muertos-4377715.html>
- Kazibwe, Z., Kim, D.H., Chun, S. y Gopal, J. (2017). Ultrasonication assisted ultrafast extraction of *Tagetes erecta* in water: cannonading antimicrobial, antioxidant components. *Journal of Molecular Liquids* 229, 453-458.
- Kotake, E. y Nagao, A. (2011). Absorption and metabolism of xanthophylls. *Marine drugs*, 9(6), 1024-1037.
- Laosinwattana, C., Wichittrakarn, P. y Teerarak, M. (2018). Composición química y acción herbicida del aceite esencial de hojas de *Tagetes erecta* L. *Industrial Crops and Products* 126, 129-134.
- Li, D. J., Song, J. F. y Liu, C. Q. (2015). Stereoisomers identification and storage stability of microencapsulated marigold lutein. *International Journal of Food Properties* 18, 178-185.
- Lin, C. y Chen, B. (2005). Stability of carotenoids in tomato juice during storage. *Food Chemistry* 90, 837-846.
- López, V.M., Dueñas, A.A., Cuenca, J.G. y Rodríguez, J.M. (2020). Caracterización fitoquímicas, actividad antioxidante y antibacteriana del aceite esencial y extractos de *Tagetes patula* sobre *Staphylococcus aureus*. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 37, 347-367.
- Ma, L. y Lin, X. (2010). Effects of lutein and zeaxanthin on aspects of eye health. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 90(1), 2-12.
- Madaan, T., Choudhary, A. N., Gyenwalee, S., Thomas, S., Mishra, H., Tariq, M. y Talegaonkar, S. (2017). Lutein, a versatile phyto-nutraceutical: an insight on pharmacology, therapeutic indications, challenges and recent advances in drug delivery. *Pharma Nutrition* 5(2), 64-75.
- Madanan, M. T., Shah, I. K., Varghese, G. K., & Kaushal, R. K. (2021). Application of Aztec Marigold (*Tagetes erecta* L.) for phytoremediation of heavy metal polluted lateritic soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3, 17-22.
- Maji, A., Beg, M., Das, S., Aktara, M. N., Nayim, S., Patra, A., Islam, M. y Hossain, M. (2020). Study on the antibacterial activity and interaction with human serum albumin of *Tagetes erecta* inspired biogenic silver nanoparticles. *Process Biochemistry*, 97, 191-200.
- Martínez, M., Cortés, A. y Ávila, E. (2004). Evaluación de tres niveles de pigmento de flor de cempasúchil (*Tagetes erecta*) sobre la pigmentación de la piel en pollos de engorda. *Técnica Pecuaria en México* 41(1), 105-111.
- Mejía, E.G., Loarca, G. y Ramos, M. (1997). Antimutagenicity of xanthophylls present in Azteca Marigold (*Tagetes erecta*) against 1-nitropyrene. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 389 (2-3), 219-226.
- Mejía, E. G., Quintanar, J.A. y Loarca, G. (1998). Antimutagenic activity of carotenoids in green peppers against some nitroarenes. *Mutation Research: Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 416(1-2), 11-19.
- Mena, M. (2018). Puebla, primer productor de flor de cempasúchil. El sol de Puebla. Disponible en: <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/puebla-primer-productor-de-flor-de-cempasuchil-2184493.html>
- Méndez, E. F. (2009). El Cultivo de Marigold (*Tagetes erecta* L.) en el Perú: Presente y futuro. Tesis de Maestría en Ciencias Agrícolas. Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Meurer, M., Mees, M., Mariano, L., Boeing, T., Somensi, L., Mariott, M., Da Silva, R., Dos Santos, A., Longo, B., Franca, T., Klein-junior, L., De Souza, P., De Andrade, S. y Da Silva, L. (2019). Hydroalcoholic extract of *Tagetes erecta* L. flowers, rich in the carotenoid lutein, attenuates inflammatory cytokine secretion and improves the oxidative stress in an animal model of ulcerative colitis. *Nutrition Research* 66, 95-106.
- Minisha, T. M., Shah, I. K., Varghese, G. K., & Kaushal, R. K. (2020). Application of Aztec Marigold (*Tagetes erecta* L.) for phytoremediation of heavy metal polluted lateritic soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*.
- Mulík, S. y Ozuna, C. (2020). Mexican edible flowers: cultural background, traditional culinary uses, and potential health benefits. *International Journal of Gastronomy and Food Science* 21, 100235.
- Muñoz, J.I., Fuente-Martínez, B., Hernandez, X. y Avila, E. (2012). Skin pigmentation in broiler chickens fed various levels of metabolizable energy and xanthophylls from *Tagetes erecta*. *Journal of Applied Poultry Research*. 21, 788-796.

- Navarrete-Bolaños, J.L., Range, C.L., Jiménez, H., Bote-llo, E., Rico, R. (2005). Pre-treatments effects on the extraction efficiency of xanthophylls from marigold flowers (*Tagetes erecta*) using hexane. *Food Research International* 38, 159-165.
- Nikkon, F., Habib, M., Karim, M., Ferdousi, Z., Rahman, M. y Haque, M. (2009). Insecticidal activity of flower of *Tagetes erecta* L. against *Tribolium castaneum* (Herbst). *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences* 5(5), 748-753.
- Pal, S. y Bhattacharjee, P. (2018). Spray dried powder of lutein-rich supercritical carbon dioxide extract of gamma-irradiated marigold flowers: Process optimization, characterization and food application. *Powder Technology* 327, 512-523.
- Peña, M. M., Cuevas, A. C. y González, E. A. (2004). Evaluación de tres niveles de pigmento de flor de cempasúchil (*Tagetes erecta*) sobre la pigmentación de la piel en pollos de engorda. *Técnica Pecuaria en México* 42(1), 105-111.
- Perry, A., Rasmussen, H. y Johnson, E. (2009). Xanthophyll (lutein, zeaxanthin) content in fruits, vegetables and corn and egg products. *Journal of Food Composition and Analysis* 22(1), 9-15.
- Piccaglia, R., Marotti, M. y Grandi, S. (1998). Lutein and lutein ester content in different types of *Tagetes patula* and *Tagetes erecta*. *Industrial Crops and Products* 8(1), 45-51.
- Ponce, J.T., Arredondo, J.L. y Vernón, E.J. (2004). Pigmentación de la tilapia (*Ereochromis niloticus*) con carotenoides de flor de cempasúchil (*Tagetes erecta*) en comparación con la astaxantina. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 3, 219-225.
- Pupo, Y.G., Vargas, H.B., Marrero, Y., Arévalo, R. y Jiménez, M.C. (2007). Effect of leaf crude extract from *Tagetes erecta* "in vitro" control of four pathogen fungi of the horticultural crops. *Centro Agrícola* 34(4), 83-86.
- Ranganathan, A., Hindupur, R. y Vallikannan, B. (2016). Biocompatible lutein-polymer-lipid nanocapsules: acute and subacute toxicity and bioavailability in mice. *Materials Science and Engineering* 9, 1318-1327.
- Rhama, S. y Madhavan, S. (2011). Antibacterial activity of the flavonoid, patulitrin isolated from the flowers of *Tagetes erecta* L. *International Journal of PharmTech Research* 3(3), 1407-1409.
- Rivera Ramírez, Y. (2012). Efecto citotóxico in vitro de extractos de *Tagetes erecta* L. en células HeLa (Doctoral dissertation).
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2019). Abasto garantizado de flor de cempasúchil, terciopelo, crisantemo y nube para esta temporada de Día de Muertos. Gobierno de México. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/abasto-garantizado-de-flor-de-zempoalxochitl-terciopelo-crisantemo-y-nube-para-esta-temporada-de-dia-de-muertos>
- Serrato, M. (2014). El recurso genético cempoalxóchitl (*Tagetes* spp.) de México. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Serrato, M., Pérez, J. (2006). Poblaciones silvestres de *Tagetes filifolia* Lag. En el centro-sur de México. *Revista Fitotecnica Mexicana* 29(2), 7-12
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (2017). Cempoalxóchitl (*Tagetes* spp.). Gobierno de México. Disponible en <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/cempoalxochitl-tagetes-spp>
- Shabbir, M., Rather, L. J. y Mohammad, F. (2018). Economically viable UV-protective and antioxidant finishing of wool fabric dyed with *Tagetes erecta* flower extract: Valorization of marigold. *Industrial Crops and Products* 119, 277-282.
- Shetty, L., F. Sakr, K., Al Obaidy, J. Patel y H. Shareef. (2015). A brief review on medicinal plant *Tagetes erecta* Linn. *Journal of Applied Pharmaceutical Science* 5(3), 091-095.
- Siriamornpun S. Kaison, O. y Meeso, N. (2012). Changes in color, antioxidant activities and carotenoids (lycopene, b-carotene, Lutein) of marigold flower (*Tagetes erecta* L.) resulting from different drying processes. *Journal of Functional Foods* 4, 757-766.
- Surai, P. F., MacPherson, A., Speake, B. K. y Sparks, N. (2000). Designer egg evaluation in a controlled trial. *European Journal of Clinical Nutrition* 54(4), 298-305.
- Tapia, M., Ricque, D., Nieto, M. y Cruz, L.E. (2008). Uso de Pigmentos de Flor de Cempasúchil (*Tagetes erecta*) como Aditivos en Alimentos. *Programa Maricultura* 492-513.
- Vásquez, C. (2008). Validación farmacológica de la actividad diurética de hojas de flor de muerto (*Tagetes erecta* L.), hojas de Santo Domingo (*Baccharis trinervis* Lam.) y hojas de matasano (*Casimiroa edulis* Llave. et Lex.) en infusión acuosa. Tesis para Título. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.



Vernon, E.J., Gómez, S.A., Beristain, C.I., Mosqueira, G., Pedroza, R. y Moreno, R.C. (1996). Color degradation and coalescence kinetics of Aztec marigold oleoresin-in-water emulsions stabilized by mesquite or Arabic gums and their blends. *Journal of Texture Studies* 27, 625-641.

Wells, C., Bertsch, W. y Perich, P. (1993). Insecticidal volatiles from the Marigold plant (genus *tagetes*). Effect of species and sample manipulation. *Cromatographia* 35(3-4), 209-215.

Xu, H., Wang, W., Jiang, J., Yuan, F. y Gao, Y. (2015). Subcritical water extraction and antioxidant activity evaluation with on-line HPLC-ABTS assay of phenolic compounds from marigold (*Tagetes erecta* L.) flower residues. *Journal of Food Science and Technology* 52(6), 3803-3811.

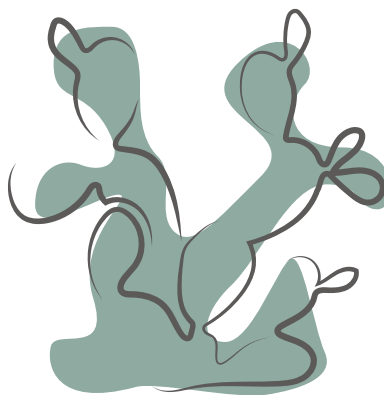
Xu, L.W., Wang, G.Y. y Shi, Y.P. 2011. Chemical constituents from *Tagetes erecta* flowers. *Chemistry of Natural Compounds* 47(2), 281-283.

Zambrano, V. M. L., Dueñas, A., Rivadeneira, J. G. C. N. y Manuel, J. (2020). Caracterización fitoquímica, actividad antioxidante y antibacteriana del aceite esencial y extractos de *Tagetes patula* sobre *Staphylococcus aureus*. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia* 37, 347-367.

Zink, T., & Geyer, R. (2017). Circular economy rebound. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 593-602.

Zolla, C. y Argueta, A. (2009). Biblioteca digital de la medicina tradicional mexicana. Landsteiner Scientific, Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, Programa Universitario México Nación Multicultural, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de: <http://www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/index.php>.

Zou, Z., Xu, X., Huang, Y., Xiao, X., Ma, L., Sun, T., Pengcheng, D., Wang, X. y Lin, X. (2011). High serum level of lutein may be protective against early atherosclerosis: the Beijing atherosclerosis study. *Atherosclerosis* 219(2), 789-793.





# Uso de zarzamora (*Rubus* spp.) como ingrediente funcional en alimentos: potencial aprovechamiento de zarzamora silvestre

Romero-Luna, Haydee Eliza<sup>1</sup>

Ortiz-Basurto, Rosa Isela<sup>2</sup>

Jiménez-Fernández, Maribel<sup>3</sup>

González-de la Tijera, María Margarita<sup>4</sup>

Peredo-Lovillo, Audry<sup>1\*</sup>

<sup>(1)</sup> Subdirección de Posgrado e Investigación, TecNM/ Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, Xalapa Enríquez, Veracruz, México.

<sup>(2)</sup> Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, TecNM/Instituto Tecnológico de Tepic, Tepic, Nayarit, México.

<sup>(3)</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana, Xalapa Enríquez, Veracruz, México.

<sup>(4)</sup> Ingeniería en Industrias Alimentarias, TecNM/ Instituto Tecnológico Superior de Xalapa, Xalapa Enríquez, Veracruz, México

\* Correspondencia

A. Peredo-Lovillo, <https://orcid.org/0000-0001-5134-8312>,

aperedo88@outlook.com; Tel. +52 2282392753

Las zarzamoras son especies del género *Rubus* cultivadas en todo el mundo, altamente adaptables a diferentes climas y de importancia industrial en la preparación de jugos, concentrados, jaleas, salsas, mermeladas y bebidas fermentadas, entre otros. El consumo de zarzamora ha sido relacionado con varios beneficios a la salud, tales como la prevención y tratamiento del síndrome metabólico, prevención de desórdenes inflamatorios y enfermedades cardiovasculares; así como, protector contra el desarrollo de cáncer a nivel gastrointestinal. Todo esto, derivado de la presencia y concentración de compuestos bioactivos como flavonoides, ácidos fenólicos, taninos y vitaminas, que hacen de las frutas del género *Rubus* una fuente significativa de ingredientes funcionales. Sin embargo, a pesar de estos beneficios, no todas las especies de este género son cultivadas para ser aprovechadas de manera industrial o gastronómica. Es por ello que esta revisión presenta información científica actual y relevante, relacionada con el estudio de los compuestos bioactivos y efectos benéficos de zarzamoras (*Rubus* spp.) silvestres, con un especial énfasis en aquellos cultivos utilizados principalmente para autoconsumo o su transformación en productos de consumo regional en algunos estados de México. Adicionalmente, se abordan las principales diferencias existentes entre los diversos compuestos fitoquímicos (antocianinas, ácidos grasos, compuestos fenólicos, vitamina C y carotenoides), y su concentración en las diferentes variedades de zarzamoras silvestres; así como su uso en la preparación de productos típicos regionales y los efectos benéficos a la salud (actividad antioxidante, antiinflamatoria, anti-obesogénica y antidiabética) obtenidos tras su consumo. La información presentada establece las bases para soportar la importancia del fu-

turo aprovechamiento de cultivos silvestres de zarzamoras, como posibles ingredientes funcionales en el desarrollo de formulaciones alimentarias, generando una oportunidad de investigación científica y tecnológica en estos cultivos poco estudiados y que pueden contribuir a la implementación de la economía circular de varias entidades Mexicanas.

Palabras clave: antocianinas; antioxidantes; compuestos fenólicos; cultivos silvestres; fitoquímicos.



## Introducción

Las zarzamoras se encuentran ampliamente distribuidas en el mundo y son reconocidas por sus efectos positivos en el tratamiento y prevención de diferentes enfermedades crónico-degenerativas, así como por sus actividades antiinflamatorias, inmunomodulatorias, anti-carcinogénicas, vasodilatadoras, antimicrobianas y antioxidantes (Seeram, 2012). El consumo de zarzamora ha aumentado debido a su sabor y valor nutricional, siendo fuente de vitaminas, minerales y fibra dietaria, con propiedades funcionales benéficas tras su consumo regular (Seeram, 2012). Los beneficios derivados del consumo de zarzamora, están asociados al contenido de compuestos bioacti-

vos (principalmente compuestos fenólicos), cuya concentración y variedad están influenciadas por condiciones climáticas de cultivo (intensidad de luz, temperatura, humedad), agro-técnicas (suelo y estado de madurez) y por la especie y variedad que se trate. Las frutas pueden ser consumidas en diversos productos como jaleas, mermeladas, jarabes, licores, helados, galletas, entre otros (Koczka *et al.*, 2018). Sin embargo, la elaboración de estos productos se basa en cuatro especies comercializadas en todo el mundo, minimizando el aprovechamiento de aquellas especies o variedades cultivadas de manera silvestre. Algunas variedades silvestres son utilizadas como ingrediente en la elaboración de diferentes productos alimenticios artesanales, los cuales han cobrado importancia en los últimos años, sin embargo, carecen de estudios relacionados a sus compuestos bioactivos, funcionalidad y efectos benéficos. Por lo tanto, el objetivo de la presente revisión es conjuntar información actual y relevante, relacionada con el estudio de los compuestos bioactivos y efectos benéficos de zarzamoras silvestres, para potencializar su uso como ingrediente funcional en alimentos y aumentar su aprovechamiento en regiones donde el cultivo de zarzamora silvestre es característico, promoviendo así la implementación de la economía circular que permita mayores beneficios económicos con impacto social a los pequeños productores.

## 1. Zarzamora

Las zarzamoras pertenecen a la familia *Rosaceae*, subfamilia *Rosoideae* y género *Rubus*, este se subdivide en 12 subgéneros (750 especies), siendo *Idaeobatus*, *Malachobatus* y *Rubus* los subgéneros más explotados a nivel mundial (Garazhian *et al.*, 2020). Se describen como frutos carnosos, formados por numerosos frutillos esféricos apiñados, con una semilla cada uno. Estas frutas alcanzan un color negro y un sabor dulce y aromático al final de su maduración. La planta es un arbusto perenne, altamente adaptable, ya sea a suelos drenados, arcillosos o húmedos, siendo tolerante a suelos poco nutritivos (Radovanović *et al.*, 2013; SIAP, 2019). Estas características facilitan su cultivo en diferentes regiones geográficas y potencializan su consumo, el cual ha incrementado en los últimos años gracias a su sabor y a sus efectos benéficos comprobados, derivados de la presencia y concentración de compuestos bioactivos como antocianinas y compuestos fenólicos (Garazhian *et al.*, 2020). México lidera la producción mundial de zarzamora con un total de 287,000 toneladas tan solo en 2018, observándose un incremento promedio del 7 % en los últimos tres años. La creciente producción de zarzamora se debe al aumento en el área de siembra y al incremento de nuevos productores, siendo *Rubus ulmifolius* la más comercial (SIAP, 2019). A pesar de que la zarzamora es un cultivo importante para México como productor y Estados Unidos como principal consumidor, la mayoría

de los estudios acerca de sus efectos benéficos y compuestos bioactivos se centran en especies y variedades cultivadas en condiciones controladas, mientras que hay pocos estudios enfocados en especies silvestres, que son poco aprovechadas en diferentes regiones geográficas (Reyes-Carmona *et al.*, 2005). Sin embargo, las zarzamoras silvestres han cobrado importancia debido a sus propiedades sensoriales, diferentes concentraciones de compuestos bioactivos y gran versatilidad para su incorporación en diferentes alimentos funcionales, abriendo así un área de investigación referente a las zarzamoras endémicas, su composición e impacto en la salud.

### 1.1 Variedades de zarzamora silvestre

Las zarzamoras poseen una historia relativamente corta (menos de un siglo), como cultivos domésticos, señalando que solo algunas generaciones han sido recolectadas directamente de sus especies silvestres progenitoras, lo cual se traduce en una extensa variedad de especies poco conocidas y poco descritas en su contenido nutricional y funcional (Garazhian *et al.*, 2020). El subgénero *Rubus* se distribuye en Europa, Asia y Norteamérica, donde se ha logrado adaptar tanto en tierras altas como tropicales (Marulanda *et al.*, 2007). Las especies de zarzamora *Rubus glaucus*, *R. ulmifolius*, *R. adenotrichus* y *R. fruticosus* son las más consumidas de forma comercial, ya sea frescas, en jaleas o en bebidas, siendo la variedad *R. fruticosus* L. la de mayor importancia económica (Acosta-Montoya *et al.*, 2010). En cuanto a las zarzamoras silvestres, existe una gran variedad de especies reportadas como endémicas o nativas de cada región, sin embargo solo de algunas se han estudiado sus características funcionales, como contenido de compuestos bioactivos y actividad antioxidante. Dichas variedades son enumeradas y clasificadas con respecto a su origen en la TABLA 1.

Tabla 1. Distribución de las especies de zarzamoras silvestres reportadas por continentes

| Especie de zarzamora silvestre*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Referencia                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>América (10 especies)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                        |
| <i>Rubus bogotensis</i> , <i>Rubus macrocarpus</i> , <i>Rubus nubigenus</i> , <i>Rubus porphyromallus</i> , <i>Rubus urticaefolius</i> , <i>Rubus adenotrichus</i> , <i>Rubus robustus</i> , <i>Rubus rosifolius</i> , <i>Rubus urticifolius</i> , <i>Rubus corifolius</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Vargas, 2002; Morulanda <i>et al.</i> , 2007; Acosta-Montoya <i>et al.</i> , 2010; Cuevas-Rodríguez <i>et al.</i> , 2010; Schulz <i>et al.</i> , 2019. |
| <b>Europa (27 especies)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                        |
| <i>Rubus discolour</i> , <i>Rubus radula</i> , <i>Rubus montanus</i> , <i>Rubus gracilis</i> , <i>Rubus macrophyllus</i> , <i>Rubus pericrispatus</i> , <i>Rubus austolovacus</i> , <i>Rubus subcatus</i> , <i>Rubus ambrosius</i> , <i>Rubus fascicatus</i> , <i>Rubus nessensis</i> , <i>Rubus glivicensis</i> , <i>Rubus caesius</i> , <i>Rubus brifonus</i> , <i>Rubus praecox</i> , <i>Rubus bifronus</i> , <i>Rubus perrobastus</i> , <i>Rubus parthenocisus</i> , <i>Rubus pseudidaeus</i> , <i>Rubus constrictus</i> , <i>Rubus chaerophylloides</i> , <i>Rubus wimmerianus</i> , <i>Rubus crispomiraginus</i> , <i>Rubus orthostachys</i> , <i>Rubus brigantinus</i> Samp., <i>Rubus vagabundus</i> Samp., <i>Rubus ulmifolius</i> . | Dujmović <i>et al.</i> , 2012; Rodrigues, 2012; Oszmiański <i>et al.</i> , 2015, Caruso <i>et al.</i> , 2019.                                          |
| <b>Asia (4 especies)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                        |
| <i>Rubus sanctus</i> , <i>Rubus caeiusus</i> , <i>Rubus persicus</i> , <i>Rubus fruticosus</i> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Garazhian <i>et al.</i> , 2020                                                                                                                         |

\*Se enumeran únicamente las especies de zarzamoras silvestres.

## 2. Composición y principales compuestos bioactivos de zarzamora *Rubus* spp.

Las zarzamoras están conformadas por 5.44 % de proteína, 77.49 % de carbohidratos, 2.43 % de cenizas y 14.59 % de fibra en base seca. Además, incluyendo a las variedades silvestres, poseen compuestos bioactivos como polifenoles y flavonoides con propiedades antioxidantes. Asimismo, son fuente de vitaminas, minerales y ácidos grasos que podrían tener un efecto sobre la funcionalidad del fruto, los cuales son descritos a continuación (TABLA 2) (Bowen-Forbes *et al.*, 2010; Modesto *et al.*, 2020).

Tabla 2. Contenido de compuestos bioactivos y actividad antioxidante de diferentes especies de *Rubus* spp.

| Zarzamora                                   | Polifenoles totales              | Antocianinas                                               | Actividad Antioxidante             | Referencias                       |
|---------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| <i>Rubus fruticosus</i> L. cv. Loch Ness    | 182.3 a 215.6 mg de EAG/100 g PF | 2204-1643 mg/100g PS                                       | Nr                                 | Ali <i>et al.</i> , 2012          |
| Zarzamora silvestre <i>Rubus fruticosus</i> | 783.8 mg de EAG/100 g PS         | Nr                                                         | EC 50 31.18 mL/g                   | Radovanović <i>et al.</i> , 2013  |
| <i>Rubus</i> sp. cv. Tupy                   | 358.99 mg de EAG/100 g PF        | 110.73 mg/100g PF                                          | EC 50 1.74 mg PF/mg DPPH           | Croge <i>et al.</i> , 2019        |
| <i>Rubus</i> sp. cv. Guarani                | 370.84 mg de EAG/100 g PF        | 118.93 mg/100g PF                                          | EC 50 1.74 mg PF/mg DPPH           | Croge <i>et al.</i> , 2019        |
| <i>Rubus</i> sp. cv. Xavante                | 460.65 mg de EAG/100 g PF        | 134.56 mg/100g PF                                          | EC 50 0.86 mg PF/mg DPPH           | Croge <i>et al.</i> , 2019        |
| <i>Rubus</i> sp. cv. Cherokee               | 346.59 mg de EAG/100 g PF        | 105.07 mg/100g PF                                          | EC 50 1.85 mg PF/mg DPPH           | Croge <i>et al.</i> , 2019        |
| <i>Rubus fruticosus</i> L.                  | 319.7 mg /100 g PF (HPLC)        | 182 mg/g PF de extracto crudo                              | Nr                                 | Van de Velde <i>et al.</i> , 2019 |
| <i>Rubus fruticosus</i>                     | 464.4 mg de EAG/100 g PF         | 124 mg de cianidin-3-glucósido /100g/                      | EC50 66.16 µg/mL                   | Santos <i>et al.</i> , 2019       |
| <i>Rubus fruticosus</i>                     | 598.0 mg de EAG/100 g PS         | Nr                                                         | 86.88 %                            | Aly <i>et al.</i> , 2019          |
| <i>Rubus</i> sp. cv. Tupy                   | 460.0 mg de EAG/100 g PF         | Antocianinas totales 68.6 mg/100g                          | 0.55 µmol de ác. Ascórbico/g DPPH  | Modesto <i>et al.</i> , 2020      |
| <i>Rubus</i> sp.                            | 594.56 mg EA-C/100g PF           | 293.5 mg de cianidin-3-glucósido equivalentes/100g muestra | 4853.82 µg Trolox equivalente/g PF | Souza <i>et al.</i> , 2020        |
| <i>Rubus brigitinus</i>                     | 281.7 mg EAG/100 g PS            | Nr                                                         | 377 µmol EAG                       | Tavares <i>et al.</i> , 2013      |
| <i>Rubus vagabundus</i>                     | 310.7 EAG/100 g PS               | Nr                                                         | 274 µmol EAG                       | Tavares <i>et al.</i> , 2013      |
| <i>Rubus sanctus</i>                        | 109.5–129.3 mg/100 g             | 85.53 – 145.09 mg /100 g                                   | 40.21 – 84.48 %                    | Garazhian <i>et al.</i> , 2020    |
| <i>Rubus hirtus</i>                         | 109.6 – 124.8 mg/100g            | 80.7 – 140.67 mg/100 g                                     | 45.36 – 71.04 %                    | Garazhian <i>et al.</i> , 2020    |
| <i>Rubus caesius</i>                        | 114.6 – 127.3 mg/100g            | 83.36 – 130.35 mg/100 g                                    | 41.92 – 81.49 %                    | Garazhian <i>et al.</i> , 2020    |

|                         |                                 |                                                     |                                             |                                |
|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Rubus persicus</i>   | 122.9 mg/100g                   | 94.92 mg/100 g                                      | 73 %                                        | Garazhian <i>et al.</i> , 2020 |
| <i>Rubus ulmifolius</i> | 541.11 mg ácido gálico/100 g PF | 68.56 mg cloruro de cianidina equivalentes/100 g PF | 61.02 377 $\mu$ mol Trolox equivalente/g PF | Caruso <i>et al.</i> , 2019    |

EAG= Equivalentes de Ácido Gálico; EAC= Equivalentes de Ácido Clorogénico; PF= Peso Fresco; PS= Peso Seco; Nr= No reportada

## 2.1 Polifenoles

Los polifenoles son un grupo numeroso de fitoquímicos que existen como metabolitos secundarios en frutas y vegetales (Aly *et al.*, 2019). En la zarzamora, los compuestos polifenólicos mayoritarios son las antocianinas, los taninos hidrolizables (galo y elagitaninos), flavonoles y flavan-3-oles, incluyendo las proantocianidinas, ácido clorogénico, procianidinas, ácido benzoico, ácido hidroxicinámico y quercetina, entre otros (Radovanović *et al.*, 2013; Van de Velde *et al.*, 2019). De estos compuestos, las antocianinas son el subgrupo más abundante y son responsables de la capacidad antioxidante de las zarzamoras, los cuales pueden suprimir la actividad de los radicales libres, evitando el desarrollo del estrés oxidativo que conlleva al padecimiento de enfermedades crónico-degenerativas (Chaves *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2020).

Debido a su funcionalidad, es importante determinar el contenido de compuestos fenólicos; el cual, en su mayoría es evaluado por un método espectrofotométrico, donde previamente se forma un complejo coloreado debido a la reacción entre los compuestos fenólicos y el reactivo Folin Ciocalteu, y la absorbancia es evaluada a una longitud de onda de 725 a 755 nm (Aly *et al.*, 2019; Modesto *et al.*, 2020). Existen otras técnicas analíticas utilizadas para la identificación y cuantificación de polifenoles, como la Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC). En este sentido, Zorzi *et al.* (2020), analizaron los compuestos fenólicos de 11 zarzamoras cultivadas en el noroeste de Italia empleando HPLC-DAD-ESI HRMS (HPLC-Diode Array Detector-UV spectra-Electrospray Ionization-Mass Spectrometry of High Resolution) detectando 70 analitos. Otro método empleado para identificar estos compuestos es el floroglucinólisis, que permite determinar proantocianidinas, además de la prueba de vainillina para taninos, que si bien no son de alta resolución, permiten identificar la presencia o ausencia de ciertos compuestos (Zorzi *et al.*, 2020).

### 2.1.1 Antocianinas

Como se mencionó anteriormente, las antocianinas se encuentran en mayor proporción en zarzamoras (54 %), seguidas de elagitaninos (37-39 %), flavonoles (8- 9 %) y ácidos hidroxicinámicos (0.7-0.9 %) (Spínola *et al.*, 2019). La antocianina mayoritaria en la zarzamora es la cianidin-3-O-glucósido, que de acuerdo con Van de Velde *et al.* (2019), representa un 84.7 % del contenido total de antocianinas. Adicionalmente se pueden encontrar la cianidin-3-rutinósido, cianidin-3-malonil glucósido y cianidin-3-dioxalil glucósido (Braga *et al.*, 2019). Bowen-Forbes *et al.* (2010), reportan que las cianidinas y pelargonidinas son las únicas agliconas de antocianinas en el género *Rubus*. Las pelargonidinas generalmente se encuentran en pequeñas cantidades junto con las cianidinas, aunque a veces se presentan como los principales pigmentos, como en el caso de la zarzamora silvestre *Rubus pileatus*.

Las antocianinas son pigmentos naturales rojos, violetas y azules, y son de los flavonoides más consumidos debido a que se encuentran en una gran variedad de frutas (Wu & Schauss, 2012). Son solubles en agua, imparten el color típico de las zarzamoras y se han considerado como posibles sustitutos de los colorantes sintéticos en los alimentos (Santos *et al.*, 2019). Además, tienen la capacidad de eliminar o reducir radicales libres, ejerciendo así una actividad antioxidante y reduciendo el estrés oxidativo causante de diversos padecimientos (Souza *et al.*, 2020).

### 2.1.2 Flavonoles

Por su parte, los flavonoles son una clase amplia de compuestos fenólicos que pueden encontrarse libres o como glucósidos en varias partes de las plantas (Modesto *et al.*, 2020). En la zarzamora se encuentran en concentraciones cerca de 1.05 mg/g de peso seco (Aly *et al.*, 2019). Los flavonoles y sus derivados glicosilados son potentes antioxidantes sintetizados por las plantas como defensa a especies reactivas de oxígeno. Pertenecientes a esta clase de compuestos, están de manera mayoritaria los mono- y diglicosilados de miricetina, kaempferol, y quercetina. Muchos de estos aglicones tienen unidos en diferentes posiciones del esqueleto, unidades de azúcar como glucosa, galactosa y arabinosa. Como se ha reportado en la literatura, los flavonoles como la quercetina, miricetina y kaempferol y sus agliconas son las más abundantes en alimentos. Zorzi *et al.* (2020), estudiaron la composición fenólica de diez especies de zarzamoras, incluyendo silvestres, observando una mayor concentración de glicósidos de quercetina dentro de la familia de los flavonoles, en todas las especies estudiadas.

## 2.2 Otros compuestos de importancia

Además de los compuestos funcionales anteriormente descritos, las zarzamoras contienen ácidos orgánicos (oxálico, málico, cítrico, tartárico y fumárico), vitaminas, como el ácido fólico y vitamina C, entre otros; que a su vez pueden potenciar las características funcionales, convirtiendo a la fruta en un alimento recomendable para personas con enfermedades cardiovasculares y obesidad, reduciendo los niveles de triglicéridos y colesterol en suero sanguíneo (Aly *et al.*, 2019).

### 2.2.1 Principales Vitaminas

La zarzamora es un fruto rico en vitaminas C, E, A y del complejo B, principalmente niacina, tiamina y riboflavina, ácido fólico y  $\beta$ -sitosterol, este último, es un fitoesterol asociado con la disminución de los niveles de lípidos en el hígado, triglicéridos y colesterol, lo cual señala a la zarzamora como una fruta útil en el tratamiento y la prevención de enfermedades circulatorias (Bowen-Forbes *et al.*, 2010).

Por otro lado, la cantidad de vitamina C en zarzamora (*Rubus fruticosus* L. cv. Loch Ness), cuantificada por Ali *et al.* (2012), fue de 11.8 a 22.1 mg por 100 g de peso fresco. Mientras que Croge *et al.* (2020), reportaron un promedio de 24.5 mg por 100 g de zarzamora *in natura* (*Rubus* sp. de cuatro cv. Tupy, Guarani, Xavante y Cherokee), que corresponde al 17 % de la ingesta diaria recomendada. Esta vitamina es reconocida por la capacidad de proteger a las células de los radicales libres, lo que puede contribuir a la prevención de enfermedades cardiovasculares y cáncer (Shareck *et al.*, 2017).

### 2.2.2 Minerales

En cuanto a los minerales presentes en la pulpa de zarzamoras, Souza *et al.* (2020), estudiaron 6 diferentes genotipos de zarzamoras de Brasil, durante tres ciclos productivos (2015-2018). Las muestras fueron liofilizadas y pulverizadas, la digestión y cuantificación de los minerales se analizó



por espectrometría de absorción atómica. Encontraron calcio (0.28-1.91 g/kg); magnesio (1.93-3.42 g/kg); potasio (entre 12.40-17.53 g/kg); fósforo (3.02-8.88 g/kg); cobre (1.65-10.42 mg/kg); hierro (42.84-52.86 mg/kg); manganeso (26.64-42.72 mg/kg); y zinc (18.68-23.65 mg/kg). Además, los autores concluyeron que dichas concentraciones de minerales son dependientes de la composición del suelo, tipo de fertilizante, condiciones climáticas y del cultivo, reportando las mismas proporciones en diferentes variedades silvestres cultivadas en la misma región.

### 2.2.3 Ácidos grasos de las semillas de zarzamora

Finalmente, las semillas de las zarzamoras son una fuente de ácidos grasos esenciales poliinsaturados. Los ácidos grasos más abundantes

presentes en las zarzamoras son el ácido palmítico, heptadecanoico, esteárico, oleico, linoleico y linolénico; con algunos ácidos grasos minoritarios como el palmitoleico, araquidónico y lignocérico. La composición de ácidos grasos determinada por cromatografía de gases registrada reporta a los ácidos oleico y linoléico, como los de mayor concentración en diversas especies (Zorzi *et al.*, 2020). Sobre la base de la caracterización de estos ácidos, el aprovechamiento de las semillas podría ser una alternativa rentable a ser considerada para la mayor valorización del fruto y evitar generar desechos orgánicos, contribuyendo a la implementación de la economía circular.

## 2.3 Propiedades funcionales de la zarzamora

Las propiedades funcionales de la zarzamora están asociadas principalmente a la actividad antioxidante de sus componentes. En este contexto, un antioxidante es cualquier sustancia que retarda o inhibe el daño oxidativo de una molécula diana, neutralizando los radicales libres. Los antioxidantes en el humano pueden prevenir la oxidación de lípidos, proteínas y otras biomoléculas, ocasionada por especies reactivas de oxígeno (ROS), como el radical hidroxilo, el peróxido de hidrógeno, superóxidos, oxígeno singulete, etc. Las ROS se producen de manera natural en los organismos vivos como subproductos de la respiración aeróbica celular, y son eliminadas por el sistema de defensa antioxidante. Sin embargo, cuando este sistema falla o es sobrepasado, aunado a un exceso en la exposición a factores ambientales como herbicidas, radiación y contaminación, puede desarrollarse un estrés oxidativo, el cual ha sido señalado como el mecanismo base de diversas enfermedades (Aly *et al.*, 2019).

Adicionalmente, las sustancias antioxidantes también pueden ejercer actividades antialérgicas, antivirales, antibacterianas, antifúngicas, antitumorales, hipoglucémicas y antihemorrágicas, estando relacionadas con la prevención de enfermedades como diabetes, enfermedades cardiovasculares y cerebrovasculares, neoplasmas, aterosclerosis, inflamación crónica y cáncer (López-Vidaña *et al.*, 2019).

La actividad antioxidante de las especies del género *Rubus* spp., se debe mayoritariamente al alto contenido de elagitaninos, antocianinas y otros compuestos fenólicos (Aly *et al.*, 2019; Spínola *et al.*, 2019). De hecho, Croge *et al.* (2019), encontraron una alta correlación entre la actividad antioxidante y el contenido de polifenoles; por lo que a mayor concentración de polifenoles, mayor actividad antioxidante. Por su parte, Zorzi *et al.* (2020), evaluaron los compuestos antioxidantes de once tipos diferentes de moras silvestres, encontrando los valores más altos en especies de zarzamoras (*Rubus fruticosus*).

Por todo lo anterior, el consumo de zarzamoras ha sido asociado al tratamiento y prevención de enfermedades, incluyendo efectos neuroprotectores contra desórdenes psiquiátricos y neurodegenerativos (Chaves *et al.*, 2020). Tavares *et al.* (2013), compararon el efecto neuroprotector de la zarzamora

comercial contra el de dos especies silvestres (*Rubus brigitinus* y *Rubus vagabundus*), observando mayor protección por parte las frutas silvestres. Esto puede estar relacionado con el incremento en la producción de metabolitos secundarios con alta actividad antioxidante, como respuesta a las condiciones adversas en las que las zarzamoras silvestres crecen.

Asimismo, los polifenoles de zarzamoras tienen la capacidad de regular los niveles de glucosa en sangre, debido a la habilidad de unirse a las proteínas, lo que les brinda la capacidad de modular la digestión y el rompimiento de la glucosa por inhibición de las enzimas digestivas (Spínola *et al.*, 2019). Con respecto a los flavonoides, estos pueden encontrarse libres o unidos a glicósidos en las plantas, presentando actividades antimicrobianas y anticancerígenas (Aly *et al.*, 2019). Por su parte, los taninos como elagitaninos, proantocianidinas y sus productos de hidrólisis pueden encontrarse en las semillas de zarzamoras, y han reportado la capacidad de reducir el riesgo de cáncer y mitigar la respuesta inflamatoria en humanos (Espín *et al.*, 2013). Sin embargo, la cantidad y el tipo de compuestos bioactivos encontrados en las zarzamoras, así como su capacidad antioxidante, dependerá de factores bióticos y abióticos como la variedad, tipo de suelo, grado de madurez, el clima, la disponibilidad de agua, manejo de los cultivos, condiciones, tiempo de almacenamiento y tratamiento poscosecha (Croge *et al.*, 2019). La presencia de estos compuestos en las zarzamoras, independientemente de su variedad, pone en evidencia su uso potencial como ingrediente funcional en diversos alimentos.

### 3. Aplicación de zarzamora como ingrediente funcional en matrices alimentarias

En la última década, los consumidores han aumentado la demanda de alimentos con propiedades funcionales. Por lo que, además de proveer al consumidor saciedad, gusto sensorial, nutrientes y energía, los alimentos deben fortificarse o adicionarse con aditivos funcionales de fuentes naturales que mejoren la salud (Colín-Cruz *et al.*, 2019). Una dieta rica en polifenoles ha sido asociada a efectos positivos a la salud, los cuales incluyen efectos antiinflamatorios, regulación de la glucosa sérica en ayunas, modulación de la microbiota intestinal y del metabolismo energético (Benedek *et al.*, 2020). Las antocianinas son de gran interés para ser aplicadas como colorantes naturales en la industria alimentaria y farmacéutica (Braga *et al.*, 2018). Además, se han asociado con la calidad nutrimental, propiedades antioxidantes y atributos sensoriales, por lo que, las zarzamoras han sido ampliamente utilizadas para la elaboración de jugos, helados, mermeladas y productos nutraceuticos (Tiwari *et al.*, 2009). Un ejemplo de esto es la extracción antocianinas mediante deshidratación y maceración a partir de zarzamora de castilla (*Rubus glaucus*) para su posterior uso como colorante en un yogurt, el cual de acuerdo panelistas no entrenados, mostró características organolépticas aceptables (Merino-Peñañiel *et al.*, 2018).

Por otro lado, se ha reportado que durante el procesamiento de la zarzamora, la piel y semillas, ambas ricas en compuestos fenólicos, ácidos grasos poliinsaturados y compuestos lipofílicos, son desechadas, resultando en una pérdida del 20 % de los compuestos bioactivos, convirtiéndose en una fuente de contaminación ambiental (Reátegui *et al.*, 2014). Por lo que, Pereira *et al.* (2019), utilizaron el fruto completo de zarzamora en la elaboración de galletas, observando un mayor contenido de compuestos fenólicos y antocianinas y fibra, señalando que la adición del fruto completo es recomendable para fortalecer al alimento y así lograr una mayor valorización del fruto. Sin embargo, el interés por utilizar estos frutos compromete la estabilidad y bioactividad de sus compuestos, por lo que se han evaluado diversos métodos con el fin de no comprometer la funcionalidad durante el procesamiento y almacenamiento de los alimentos, como se discute en la siguiente sección.

## 4. Estabilidad de los compuestos funcionales durante el procesamiento y almacenamiento de los alimentos

Durante las últimas décadas ha habido una preocupación por mantener el valor nutricional y la calidad durante el procesamiento de los alimentos, incluyendo la estabilidad de polifenoles y su actividad antioxidante, ya que, debido a la inestabilidad de su estructura nativa, pierden parte de su funcionalidad y por lo tanto su actividad benéfica (Braga *et al.*, 2019). De esta forma, el interés por conservar los compuestos bioactivos ha llevado a innovar los procesos de extracción y estabilización, minimizando el uso de altas temperaturas y solventes no aptos para consumo (Barba *et al.*, 2015). Sin embargo, dichos compuestos son susceptibles a la degradación durante las etapas de extracción, procesamiento y almacenamiento del producto (Wang & Xu, 2007).

Se ha reportado que la transformación y degradación de antocianinas pueden ocurrir durante el procesamiento y almacenamiento de alimentos, alterando el color y la funcionalidad de los compuestos bioactivos (Olivas-Aguirre *et al.*, 2016). De forma general, la degradación de antocianinas es uno de los principales procesos que afectan el contenido total de fenoles, lo que ha sido atribuido a la oxidación indirecta de las quinonas fenólicas generadas por las enzimas polifenol oxidasa y peroxidasa endógenas (Nayak *et al.*, 2015). Esta degradación de antocianinas puede ocurrir antes del tratamiento térmico (por polimerización enzimática) y durante el almacenamiento, dando como resultado la pérdida de antocianinas monoméricas.

No obstante, la matriz alimentaria puede tener un efecto protector sobre la estabilidad de las antocianinas de las zarzamoras durante el procesamiento, generado principalmente por la presencia de azúcares (Benedek *et al.*, 2020). Sin embargo, las condiciones del procesamiento cuando la zarzamora es incorporada a la matriz alimentaria, pueden afectar los compuestos fenólicos; además, la estabilidad de las antocianinas también puede verse afectada por diversos factores asociados a la matriz alimentaria y las condiciones de almacenamiento como pH, luz, temperatura y la presencia de agentes quelantes como proteínas o metales, por lo que algunos cambios de color en alimentos que contienen antocianinas podrían estar dados por cambios en su estructura que conducen a pigmentos amarillos o pardos (Nayak *et al.*, 2015).

### 4.1 Estabilidad durante procesos térmicos

Cuando se realiza un procesamiento térmico ocurren reacciones oxidativas que dan como resultado el oscurecimiento de los alimentos (Brandão *et al.*, 2018). La alteración del color durante el procesamiento térmico y en los productos almacenados se debe a múltiples factores, como la degradación y polimerización de los pigmentos, interacciones con otros componentes de la matriz y reacciones oxidativas (reacciones de Maillard, caramelización y oxidación de taninos) (Olivas-Aguirre *et al.*, 2016). Con el fin de evitar esto, es importante optimizar las operaciones de producción, ya que un alimento correctamente procesado y almacenado bajo las condiciones determinadas con base en sus componentes funcionales, va a conservarse mayor tiempo sin alteraciones del valor nutricional, atributos de color y la funcionalidad de los compuestos (Nayak *et al.*, 2015).

## 4.2 Principales procesamientos no térmicos aplicados en alimentos

Durante la elaboración de jugos, bebidas, concentrados, jarabes, mermeladas, jaleas, vinos, salsas, se desechan grandes cantidades de subproductos, los cuales contienen nutrientes y compuestos bioactivos (Kitryte *et al.*, 2020). Este hecho ha incrementado el interés en el desarrollo de métodos de extracción de compuestos bioactivos a partir de los subproductos, para posteriormente ser añadidos a algún otro alimento. Por lo tanto, a continuación se presentan algunos métodos alternativos utilizados en la industria alimentaria para la extracción de compuestos bioactivos.

### 4.2.1 Estabilidad durante el procesamiento a altas presiones

Una de las alternativas de extracción es el uso de altas presiones con fluidos supercríticos, la cual ha ganado importancia, ya que ofrece una mayor velocidad de extracción, mayor rendimiento, selectividad, consumo reducido de disolventes, bajo riesgo de degradación térmica, ausencia de luz y oxígeno durante la extracción, lo que permite mayor estabilidad de compuestos comparado con métodos convencionales (Baldino & Reverchon, 2018). Estas ventajas se deben principalmente a que las antocianinas son compuestos termolábiles, por lo que el uso de temperaturas altas puede tener un efecto negativo en su estabilidad, tal es el caso de lo reportado por Kitryte *et al.*, (2020), quienes después extraer compuestos del orujo de zarzamora con fluidos supercríticos, solo detectaron cianidina-3-glucósido, asociando el bajo rendimiento obtenido al aumento de las temperaturas (de 64 a 130 °C) durante la última etapa del proceso de extracción.

### 4.2.2 Estabilidad durante el proceso de liofilización.

La incorporación de antocianinas en alimentos se ha visto limitada por su inestabilidad. Es por ello que la liofilización ha sido utilizada como una alternativa para secar alimentos que contienen compuestos antioxidantes sensibles al calentamiento, permitiendo mantener su estabilidad gracias al uso de bajas temperaturas para eliminar el contenido de agua, lo cual, facilita su uso como colorantes naturales o como productos nutraceuticos con valor agregado (Celli *et al.*, 2016). Otras ventajas de la liofilización es el fácil almacenamiento, transporte y empaque a bajo costo del producto generado, además puede mejorar la calidad del alimento, ya que con la reducción de  $a_w$ , se bloquea el deterioro microbiano (Kamiloglu *et al.*, 2016). Aunado a esto, el fruto entero puede ser secado por liofilización y utilizado como ingrediente funcional con un mayor contenido de fibra. Ejemplo de ello es un pan crujiente adicionado con polvo de zarzamora liofilizado, el cual posee una mayor aceptabilidad general (apariencia, gusto y sabor) que la del pan crujiente testigo (sin polvo de zarzamora), elaborado por Różyło *et al.* (2019). Además, la adición de zarzamora incrementó el potencial nutrimental del pan crujiente, debido al aumento del contenido de minerales, flavonoides, compuestos fenólicos y antocianinas monoméricas. Estos resultados evidencian a la zarzamora como un ingrediente, que además de proporcionar color, mejora el aspecto y la aceptabilidad de un alimento, considerándose un aditivo funcional que mejora la calidad nutrimental de los alimentos.

En este sentido, Braga *et al.* (2019), elaboraron un polvo con pulpa de zarzamora y leche mediante liofilización, conservando la capacidad antioxidante de los compuestos bioactivos presentes en la pulpa de zarzamora. Lo que denota que ni el proceso de liofilización ni la adición de un coadyuvante como la leche, afectan la estabilidad de los compuestos bioactivos.

### 4.3 Estabilidad de compuestos funcionales en el secado por aspersión

El secado por aspersión ha sido utilizado desde hace décadas con el fin de obtener rápidamente ingredientes alimentarios. La presencia de acarreadores, estabilizantes y materiales de pared permite la protección mediante la encapsulación de compuestos termolábiles, como compuestos aromáticos, colorantes, lípidos y compuestos bioactivos. Debido a que el proceso se realiza en corto tiempo de residencia en el equipo para una rápida evaporación de disolventes, es mínima la degradación de compuestos termosensibles (Braga *et al.*, 2018). Este proceso de microencapsulación es útil para obtener polvos, reducir el contenido de agua de matrices alimentarias líquidas y prevenir el fenómeno de degradación. Es así como este método ha sido señalado como adecuado para encapsular y mantener estables extractos ricos en antocianinas de zarzamora, que acompañados de coadyuvantes como leche, maltodextrinas y gomas, dan como resultado la obtención de un aditivo estable, conservando sus características nutricionales, aun en tiempos prolongados de almacenamiento (Weber *et al.*, 2017; Braga *et al.*, 2018).

Sin embargo, los acarreadores utilizados como materiales de pared pueden modificar la estabilidad de los compuestos fenólicos de un polvo de zarzamora producido por secado por aspersión; el efecto de estos se tratará en el siguiente apartado.

### 4.4 Efecto de la incorporación de aditivos/materiales de pared sobre la estabilidad durante el almacenamiento

La incorporación de otros ingredientes a una matriz alimentaria puede generar interacciones con los compuestos funcionales de la zarzamora y afectar o desarrollar un efecto protector sobre la estabilidad de su estructura. Existen pocos estudios sobre estas interacciones, sin embargo, entre los aditivos estudiados se encuentran los azúcares de alcohol, presentes en alimentos con bajo contenido energético. El estilo de vida actual y las tendencias modernas de nutrición han llevado a los consumidores a ingerir alimentos con un menor contenido energético, por lo que el uso de azúcares de alcohol se ha visto incrementado en productos con bajo contenido calórico. A este respecto, se han producido mermeladas y jaleas de zarzamora bajas en calorías elaboradas con azúcares de alcohol, resistentes al cambio de pH y al calor, por lo que no participan en reacciones de Maillard, mostrando ventajas sobre el uso tradicional de azúcares (Benedek *et al.*, 2020). Esta característica representa una ventaja en la estabilidad de los compuestos fenólicos de la zarzamora. Sin embargo, un estudio mostró un deterioro en el contenido de antocianinas durante el almacenamiento de mermeladas de zarzamora elaboradas con xilitol, eritritol, fructosa y sacarosa. En este sentido, la mermelada con fructosa presentó una degradación más rápida de antocianinas, lo que, de acuerdo con los autores, puede ser atribuido al aumento en la velocidad de la reacción de Maillard en presencia de fructosa y por la subsecuente formación de furfural e hidroximetilfurfural. Esta misma muestra también tuvo un incremento en catequina, ácidos fenólicos y agliconas flavonoides durante el almacenamiento, lo que puede deberse a la descomposición de la matriz alimentaria, resultando en la generación de ácidos fenólicos libres o la liberación de flavonoides en forma de agliconas libres y sus correspondientes glucósidos (Benedek *et al.*, 2020). En complemento, se ha mencionado que la adición de sacarosa podría mejorar el color, ya que el azúcar podría ejercer un efecto estabilizador sobre las antocianinas monoméricas disminuyendo su velocidad de degradación, esto como consecuencia de la caída en la actividad de agua (Sokół-Letowska *et al.*, 2018).



La generación de microencapsulados como ingredientes alimenticios funcionales incluye la adición de materiales de pared que permitan mantener la estabilidad de los compuestos. Sin embargo, muchos de ellos podrían tener interacciones con los compuestos bioactivos y favorecer la degradación de estos, ya que la composición química del compuesto bioactivo y la estructura polielectrolítica posiblemente estén involucradas en las interacciones polímero-compuesto bioactivo (Robert *et al.*, 2010). A este respecto, se ha reportado que polisacáridos como la goma arábiga, que contiene grupos hidroxilos (OH-) en su estructura molecular, mejora la naturaleza hidrofílica de la molécula y pueden formar puentes de hidrógeno con el agua presente en el jugo de zarzamora encapsulado. Por lo tanto, los OH- promueven la interacción entre material de pared y compuestos encapsulados para formar la matriz de recubrimiento y al mismo tiempo proteger el material encapsulado (Janjarasskul & Krochta, 2010). Sin embargo, según lo reportado por Colín-Cruz *et al.* (2019), un encapsulado con maltodextrina presentó cinéticas de degradación de antocianinas, inicialmente asociadas con una interacción entre las antocianinas y la maltodextrina que fue mediada por una sustitución nucleofílica de grupos OH- de la maltodextrina en medio ácido. La siguiente etapa de las cinéticas de degradación se presentó después de las primeras cuatro semanas de almacenamiento, y estuvo caracterizada por una rápida disminución en la estabilidad de las antocianinas. Por el contrario, otros polímeros utilizados en el mismo estudio (goma arábiga y proteína de suero de leche) presentaron una mayor protección del compuesto durante el mismo tiempo de almacenamiento. Estas diferencias en la protección de los compuestos bioactivos encapsulados durante el almacenamiento pueden deberse a la afinidad de los grupos funcionales presentes en los biopolímeros protectores y el compuesto bioactivo, modulando su degradación. Adicionalmente, mezclas de biopolímeros han sido evaluadas como materiales de pared para la encapsulación de compuestos bioactivos. Ejemplo de ello es la encapsulación de antocianinas de zarzamora con una mezcla de goma arábiga y maltodextrina, la cual mostró una mayor protección del compuesto posiblemente debido a una fuerte interacción electrostática entre antocianinas-maltodextrina-goma arábiga (Colín-Cruz *et al.*, 2019). Asimismo, se ha mencionado que la retención de pigmentos podría estar asociada al alto grado de hidrólisis de maltodextrinas y contenido de proteínas en la goma arábiga, lo que conduciría a una alta capacidad emulsificante la cual puede mejorar la conformación de antocianinas durante la formación de las cápsulas (Carvalho *et al.*, 2016).

## 5. Conclusiones y perspectivas

Las zarzamoras silvestres, cultivadas de manera no estandarizada, poseen una diversidad de compuestos funcionales benéficos para la salud. La presencia de estos compuestos dentro de la fruta, depende directamente de las condiciones de cultivo, las cuales definen tanto el contenido de metabolitos secundarios como su funcionalidad. Las zarzamoras comerciales y silvestres brindan atributos sensoriales y funcionales que potencializan su uso como ingrediente en diversas matrices alimentarias. Sin embargo, estos compuestos pueden sufrir degradación durante su procesamiento y almacenamiento, por lo que se han evaluado diferentes métodos alternativos de extracción y procesamiento con el fin de minimizar su pérdida. En conclusión, el contenido de compuestos bioactivos, así como la calidad y valor nutricional de las especies más comercializadas de zarzamora, son comparables con los de las zarzamoras silvestres, las cuales, además de ser consumidas de manera regional, han sido subutilizadas debido a los limitados estudios sobre sus propiedades funcionales. Por lo tanto, es necesario el desarrollo de proyectos de investigación, enfocados en la identificación de compuestos funcionales presentes en zarzamoras silvestres, así como la implementación de tecnologías que optimicen la elaboración y conservación de productos regionales artesanales, que incorporen dichos frutos. Estas acciones en conjunto, permitirán la valorización de los cultivos silvestres y con ello



el desarrollo tecnológico y económico en comunidades rurales donde se requiere la valorización de la zarzamora silvestre y subproductos, favoreciendo con ello la implementación de la economía circular con diversificación de impactos.

**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

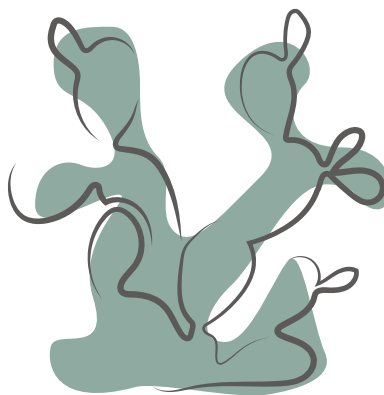
**Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## 6. Referencias

- Acosta-Montoya, Ó., Vaillant, F., Cozzano, S., Mertz, C., Pérez, A. M., & Castro, M. V. (2010). Phenolic content and antioxidant capacity of tropical highland blackberry (*Rubus adenotrichus* Schltdl.) during three edible maturity stages. *Food Chemistry*, 119, 1497-1501.
- Ali, L., Alsanius, B. W., Rosberg, A. K., Svensson, B., Nielsen, T., & Olsson, M. E. (2012). Effects of nutrition strategy on the levels of nutrients and bioactive compounds in blackberries. *European Food Research and Technology*, 234, 33-44.
- Aly, A., Maraei, R., & Abou El-Leel, O. (2019). Comparative study of some bioactive compounds and their antioxidant activity of some berry types. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 13, 515-523.
- Baldino, L., & Reverchon, E. (2018). Challenges in the production of pharmaceutical and food related compounds by SC-CO<sub>2</sub> processing of vegetable matter. *The Journal of Supercritical Fluids*, 134, 269-273.
- Barba, F. J., Galanakis, C. M., Esteve, M. J., Frigola, A., & Vorobiev, E. (2015). Potential use of pulsed electric technology and ultrasounds to improve the recovery of high-added value compounds from blackberries. *Journal of Food Engineering*, 167, 38-44.
- Benedek, C., Bodor, Z., Merrill, V. T., Kókai, Z., Gere, A., Kovacs, Z., Damaldi, I., & Abrankó, L. (2020). Effect of sweeteners and storage on compositional and sensory properties of blackberry jams. *European Food Research and Technology*, 246, 2187-2204.
- Bowen-Forbes, C. S., Zhang, Y., & Nair, M. G. (2010). Anthocyanin content, antioxidant, anti-inflammatory and anticancer properties of blackberry and raspberry fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, 23, 554-560.
- Braga, M. B., Rocha, S. C. D. S., & Hubinger, M. D. (2018). Spray-drying of Milk-Blackberry pulp mixture: Effect of carrier agent on the physical properties of powder, water sorption, and glass transition temperature. *Journal of Food Science*, 83, 1650-1659.
- Braga, M. B., Veggi, P. C., Codolo, M. C., Giaconia, M. A., Rodrigues, C. L., & Braga, A. R. C. (2019). Evaluation of freeze-dried milk-blackberry pulp mixture: Influence of adjuvants over the physical properties of the powder, anthocyanin content and antioxidant activity. *Food Research International*, 125, 108557.
- Brandão, T. M., Do Carmo, E. L., Elias, H. E. S. de Carvalho, E. E. N., Borges, S. V., & Martins, G. A. S. (2018). Physicochemical and microbiological quality of dietetic functional mixed cerrado fruit jam during storage. *The Scientific World Journal*. 2018:2878215.
- Caruso, M. C., Galgano, F., Grippo, A., Condelli, N., Di Cairano, M., & Tolve, R. (2019). Assay of healthful properties of wild blackberry and elderberry fruits grown in Mediterranean area. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 1591-1598.
- Carvalho, A. G. S., Machado, M. T. C., Silva, V. M., Sartoratto, A., Rodrigues, R. A. F., & Hubinger, M. D. (2016). Physical properties and morphology of spray dried microparticles containing anthocyanins of jussara (*Euterpe edulis* Martius) extract. *Powder Technology*, 294, 421-428.
- Celli, G. B., Dibazar, R., Ghanem, A., & Brooks, M. S.-L. (2016). Degradation kinetics of anthocyanins in freeze-dried microencapsulates from lowbush blueberries (*Vaccinium angustifolium* Aiton) and prediction of shelf-life. *Drying Technology*, 34, 1175-1184.
- Chaves, V. C., Soares, M. S., Spohr, L., Teixeira, F., Vieira, A., Constantino, L. S., Pizzol, F. D., Lencina, C. L., Spanevello, C. L., Freitas, M. P., & Simões, C. M., Reginatto, F. H., Stefanello, F. M. (2020). Blackberry extract improves behavioral and neurochemical dysfunctions in a ketamine-induced rat model of mania. *Neuroscience Letters*, 714, 134566.
- Colín-Cruz, M. A., Pimentel-González, D. J., Carrillo-Navas, H., Alvarez-Ramírez, J., & Guadarrama-Lezama, A. Y. (2019). Co-encapsulation of bioactive compounds from blackberry juice and probiotic bacteria in biopolymeric matrices. *LWT*, 110, 94-101.
- Croge, C. P., Cuquel, F. L., Pintro, P. T., Biasi, L. A., & De Bona, C. M. (2019). Antioxidant Capacity and Polyphenolic Compounds of Blackberries Produced in Different Climates. *Horticultural Science*, 54, 2209-2213.
- Cuevas-Rodríguez, E. O., Dia, V. P., Yousef, G. G., Garcia-Saucedo, P. A., López-Medina, J., Paredes-Lopez, O., Gonzalez de Mejia, E., & Lila, M. A. (2010). Inhibition of pro-inflammatory responses and antioxidant capacity of Mexican blackberry (*Rubus* spp.) extracts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 9542-9548.

- Dujmović, P. D., Duralija, B., Voća, S., Vokurka, A., & Ercisli, S. (2012). A comparison of fruit chemical characteristics of two wild grown *Rubus* species from different locations of Croatia. *Molecules*, 17, 10390–10398.
- Espín, J. C., Larrosa, M., García-Conesa, M. T., Tomás-Barberán (2013). Biological significance of urolithins, the gut microbial ellagic acid-derived metabolites: the evidence so far. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2013.
- Garazhian, M., Gharaghani, A., & Eshghi, S. (2020). Genetic diversity and inter-relationships of fruit bio-chemicals and antioxidant activity in Iranian wild blackberry species. *Scientific Reports*, 10, 1–13.
- Janjarasskul, T., & Krochta, J. M. (2010). Edible packaging materials. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1, 415–448.
- Kamiloglu, S., Toydemir, G., Boyacioglu, D., Beekwilder, J., Hall, R. D., & Capanoglu, E. (2016). A review on the effect of drying on antioxidant potential of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56, S110–S129.
- Kitrytė, V., Narkevičiūtė, A., Tamkutė, L., Syrpas, M., Pukalskienė, M., & Venskutonis, P. R. (2020). Consecutive high-pressure and enzyme assisted fractionation of blackberry (*Rubus fruticosus* L.) pomace into functional ingredients: Process optimization and product characterization. *Food Chemistry*, 312, 126072.
- Koczka, N., Stefanovits-Banyai, E., & Prokaj, E. (2018). Element composition, total phenolics and antioxidant activity of wild and cultivated blackberry (*Rubus fruticosus* L.) fruits and leaves during the harvest time. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 46, 563–569.
- López-Vidaña, E. C., Pilatowsky Figueroa, I., Antonio Marcos, E. G., Navarro-Ocaña, A., Hernández-Vázquez, L., & Santiago-Urbina, J. A. (2019). Solar drying kinetics and bioactive compounds of blackberry (*Rubus fruticosus*). *Journal of Food Process Engineering*, 42, e13018.
- Marulanda, M. L., López, A. M., & Aguilar, S. B. (2007). Genetic diversity of wild and cultivated *Rubus* species in Colombia using AFLP and SSR markers. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 7.
- Merino-Peñaflí, C. O., Morejón, I. F. B., Cruz, M. E., García, A. W., Espinoza, S. L. R., Jaramillo, M. M., del Salto, L. V., León, A. T., Pacha, I. M., Gallo, C. G., Samano, M. A., & Román, A. (2018). Usage of two extraction methods for natural dyes (anthocyanin) from blackberries of castilla (*Rubus glaucus* Benth) and its application in yogurt. *Journal of Food and Nutrition Research*, 6, 699–705.
- Modesto, J. H., Souza, J. M. A., Ferraz, R. A., Silva, M. D. S., Leonel, M., & Leonel, S. (2020). Physical and chemical characterization and bioactive compounds from blackberry under calcium chloride application. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 42.
- Nayak, B., Liu, R. H., Tang, J. (2015). Effect of processing on phenolic antioxidants of fruits, vegetables, and grains—a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55, 887–919.
- Olivas-Aguirre, F. J., Rodrigo-García, J., Martínez-Ruiz, N. D. R., Cárdenas-Robles, A. I., Mendoza-Díaz, S. O., Álvarez-Parrilla, E., González-Aguilar, G. A., De la Rosa, L. A., Ramos-Jiménez, A., & Wall-Medrano, A. (2016). Cyanidin-3-O-glucoside: physical-chemistry, foodomics and health effects. *Molecules*, 21, 1–30.
- Ozsmiański, J., Nowicka, P., Teleszko, M., Wojdyło, A., Cebulak, T., & Oklejewicz, K. (2015). Analysis of phenolic compounds and antioxidant activity in wild blackberry fruits. *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 14540–14553.
- Pereira, A. P. A., Clerici, M. T. P. S., Schmiele, M., & Pastore, G. M. (2019). Blackberries (*Rubus* sp.) and whole grain wheat flour in cookies: evaluation of phenolic compounds and technological properties. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 1445–1453.
- Radovanović, B. C., Anđelković, S. M., Radovanović, A. B., & Anđelković, M. Z. (2013). Antioxidant and antimicrobial activity of polyphenol extracts from wild berry fruits grown in southeast Serbia. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 12, 813–819.
- Reátegui, J. L. P., Machado, A. P. F., Barbero, G. F., Rezende, C. A., Martínez, J. (2014). Extraction of antioxidant compounds from blackberry (*Rubus* sp.) bagasse using supercritical CO<sub>2</sub> assisted by ultrasound. *The Journal of Supercritical Fluids*, 94, 223–233.
- Reyes-Carmona, J., Yousef, G. G., Martínez-Peniche, R. A., & Lila, M. A. (2005). Antioxidant capacity of fruit extracts of blackberry (*Rubus* sp.) produced in different climatic regions. *Journal of Food Science*, 70, 497–503.

- Robert, P., Gorená, T., Romero, N., Sepulveda, E., Chavez, J., & Saenz, C. (2010). Encapsulation of polyphenols and anthocyanins from pomegranate (*Punica granatum*) by spray drying. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 1386–1394.
- Rodrigues, L. (2012). Evaluation of neuroprotective potential of polyphenols derived from Portuguese native plants: *Juniperus* sp. and *Rubus* sp. (Tesis de Doctorado). Instituto de Tecnologia Química e Biológica/UNL, Oeiras, Portugal.
- Różyło, R., Wójcik, M., Biernacka, B., & Dzik, D. (2019). Gluten-free crispbread with freeze-dried blackberry: quality and mineral composition. *CyTA-Journal of Food*, 17, 841–849.
- Santos, S. S., Rodrigues, L. M., Costa, S. C., & Madrona, G. S. (2019). Antioxidant compounds from blackberry (*Rubus fruticosus*) pomace: Microencapsulation by spray-dryer and pH stability evaluation. *Food Packaging and Shelf Life*, 20, 100177.
- Schulz, M., Seraglio, S. K. T., Della Betta, F., Nehring, P., Vales, A. C., Daguer, H., Valdemiro, L., Oliveira, A. C., & Fett, R. (2019). Blackberry (*Rubus ulmifolius* Schott): Chemical composition, phenolic compounds and antioxidant capacity in two edible stages. *Food Research International*, 122, 627–634.
- Seeram, N. P. (2012). Emerging research supporting the positive effects of berries on human health and disease prevention. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 5885–5886.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). Zarzamora. En: *Panorama Agroalimentario 2019*, (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Ed.). Pp. 1556–157, Ciudad de México, México.
- Shareck, M., Rousseau, M. C., Koushik, A., Siemiatycki, J., & Parent, M. E. (2017). Inverse association between Dietary intake of selected carotenoids and Vitamin C and risk of lung cancer. *Frontiers in Oncology*, 7, 23.
- Sokół-Łetowska, A., Kucharska, A. Z., Szumny, A., Winska, K., & Nawirska-Olszanska, A. (2018). Phenolic composition stability and antioxidant activity of sour cherry liqueurs. *Molecules*, 23, 2156.
- Souza, R. S., Martins, C. R., Antunes, L. E. C., Vizzotto, M., Krolow, A. C. R., & Malgarim, M. B. (2020). Chemical and mineral characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of blackberries grown in an organic system. *Comunicata Scientiae*, 11, e3272–e3272.
- Spinola, V., Pinto, J., Llorent-Martínez, E. J., Tomás, H., & Castilho, P. C. (2019). Evaluation of *Rubus grandifolius* L. (wild blackberries) activities targeting management of type-2 diabetes and obesity using in vitro models. *Food and Chemical Toxicology*, 123, 443–452.
- Tavares, L., Figueira, I., McDougall, G. J., Vieira, H. L., Stewart, D., Alves, P. M., Ferreira, R. B., & Santos, C. N. (2013). Neuroprotective effects of digested polyphenols from wild blackberry species. *European Journal of Nutrition*, 52, 225–236.
- Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P., Muthukumarappan, K., Cullen, P. J. (2009). Anthocyanin and color degradation in ozone-treated blackberry juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10, 70–75.
- Van de Velde, F., Esposito, D., Grace, M. H., Pirovani, M. E., & Lila, M. A. (2019). Anti-inflammatory and wound healing properties of polyphenolic extracts from strawberry and blackberry fruits. *Food Research International*, 121, 453–462.
- Vargas, W. (2002). Guía ilustrada de las plantas de las montañas de Quindío y los Andes centrales. Universidad de Caldas y Corporación Autónoma Regional de Quindío, Manizales, Colombia, 813p.
- Wang, W. D. & Xu, S. Y. (2007). Degradation kinetics of anthocyanins in blackberry juice and concentrate. *Journal of Food Engineering*, 82, 271–275.
- Weber, F., Boch, K., & Schieber, A. (2017). Influence of copigmentation on the stability of spray dried anthocyanins from blackberry. *LWT-Food Science and Technology*, 75, 72–77.
- Wu, X., & Schauss, A. G., (2012). Mitigation of inflammation with foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 6703–6717.
- Zorzi, M., Gai, F., Medana, C., Aigotti, R., Morello, S., & Peiretti, P. G. (2020). Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of Small Berries. *Foods*, 9, 623.



## Revalorización de coproductos agroindustriales del beneficio del café (*Coffera arabica*) en la región Frailesca, Chiapas, como fuente de compuestos bioactivos

Santiago-Ruiz, Marco Antonio  
Totosaus, Alfonso\*

Laboratorio y Planta piloto de alimentos, Tecnológico Nacional de México/TES Ecatepec, Ecatepec de Morelos, México.

\* Correspondencia  
AT <https://orcid.org/0000-0003-1965-9510>,  
atotosaus@tese.edu.mx; Tel.: 55 5000 2300

Una de las regiones de mayor producción de café del estado de Chiapas es la región Frailesca, sin embargo, durante el procesamiento agroindustrial se genera una importante cantidad de coproductos, como residuos de pulpa y cisco, los cuales no son aprovechados en su totalidad. Los subproductos que son generados en esta agroindustria contienen una importante cantidad de compuestos bioactivos, principalmente fibra y antioxidantes, los cuales pueden ser extraídos para fomentar la economía circular, al ser ingredientes utilizables en la industria alimentaria. Este capítulo hace una breve revisión de las metodologías que se emplean actualmente en la recuperación de compuestos bioactivos a partir de coproductos del beneficio del café. Los procesos de extracción líquido-sólido utilizan solventes orgánicos, donde dependiendo de la polaridad de este, serán los compuestos fenólicos extraídos. Estos deben ser evaporados después para obtener una oleoresina. Recientemente se realizaron extracciones utilizando aceites vegetales, con mejora de la composición de los extractos. En adición, el alto contenido de fibra en los residuos de la extracción pueden ser valorados como prebióticos, otro ingrediente que se puede utilizar para mejorar la calidad nutricional de varios alimentos. Esta posibilidad de utilizar los coproductos agroindustriales para recuperar antioxidantes y fibra, además de permitir el aprovechamiento integral de la materia prima, generará un recurso a la comunidad mejorando la economía local, además de aumentar la actividad del sector con más puestos de trabajo.

**Palabras clave:** beneficio del café; compuestos bioactivos; coproductos; economía circular; extracción.





## Introducción

Actualmente, es necesario un cambio global en las industrias a cualquier nivel, del modelo actual lineal y no-reciclable a un modelo circular de reciclaje/recuperación, donde todas las partes involucradas tengan una oportunidad de participar, ya que la incipiente escasez de recursos ambientales, junto con cambios en el comportamiento de la mayoría de los consumidores, al menos en países desarrollados, apuntan a un modelo de ecosistemas de productos y servicios más ecológicos y respetuosos del medio ambiente. La economía circular se considera como un enfoque que empareja eficazmente el crecimiento con el desarrollo económico, ambiental y so-

cial sostenible, proporcionando un modelo de flujo cíclico alternativo a los modelos convencionales de economía lineal (Avramidou *et al.*, 2020). Actualmente, el concepto de economía circular se está convirtiendo en una parte integral de los procesos tecnológicos industriales llamados “verdes” o ambientales.

El procesamiento o beneficio de productos agroindustriales genera una gran cantidad de residuos que tienen un impacto ambiental y socioeconómico. Una manera de reducir estos impactos es a través de la economía circular, la cual tiene como objetivo resolver los desafíos del manejo de recursos, desechos y emisiones que enfrenta la sociedad mediante la creación de una cadena de suministro total desde la producción hasta el consumo. Actualmente, la agroindustria es reconocida no solo por su producción e impacto económico a nivel mundial, sino también por los procesos que se implementan para disminuir el impacto ambiental que generan sus residuos durante los procesos previos a la producción, manejo, procesamiento y comercialización, se generan subproductos o residuos que conllevan serios problemas asociados a su disposición final (Cury *et al.*, 2017).

El café es una planta tropical perteneciente al género *Coffea* de la familia *Rubiaceae*, y aunque hoy en día hay más de 100 especies, son solo dos las responsables del comercio mundial: *arabica* (60 % del café comercializado a nivel mundial) y *canephora* (Naranjo *et al.*, 2011). Los residuos producidos y los recursos utilizados pueden ser minimizados cuando la estructura lineal de la economía de la cadena de suministro de café evoluciona hacia una estructura de economía circular, los principales residuos son durante la cosecha, igual que el beneficio. De hecho, una taza que contenga cerca de 10 g de café deshidratado produce a través de su cadena de producción 49 g de emisiones de CO<sub>2</sub>, 9.9 g de residuos de café seco, 6.9 g de pulpa y cascarilla de café (Avraamidou *et al.*, 2020). Debido a esto, es muy relevante proponer alternativas para su transición a una economía circular, la cual genere bienes y servicios que tengan como fin el aprovechamiento integral de los coproductos del beneficio del café.

En este sentido, varios esfuerzos se están llevando a cabo para la utilización de coproductos –del beneficio– o residuos –de la preparación– de café como recurso para la producción de combustibles debido a que contienen aceite y carbohidratos se pueden convertir en biodiésel y bioetanol, o bien en biopolímeros, carbón activado, polioles, espumas de poliuretano, carotenoides, y antioxidantes, entre otros (Karmee, 2018).



Hay varios ejemplos de la utilización sustentable de los coproductos agroindustriales a través de su integración a procesos que tienen como objetivos la generación de productos de mayor valor agregado. El usar coproductos del beneficio del café en el cultivo de hongos holísticamente ayuda a mejorar el rendimiento. O bien la producción de pectinasa a partir de pulpa de café como fuente de carbono en fermentación en medio sólido con *A. niger*. Además de obtener fracciones de celulosa y hemicelulosa a partir de la cascarilla de café (Murthy y Naidu, 2012b). El implementar tecnologías “cero coproductos” que bien extraigan los compuestos bioactivos o biopolímeros estructurales a partir de coproductos, o bien utilizarlos como materia prima en el desarrollo de biorrefinerías, abren la posibilidad de desarrollar productos amigables con el medio ambiente, con potencial comercial para contribuir a la economía circular (Orejuela, 2019).

### Compuestos bioactivos del beneficio del café

Como ocurre con la mayor parte de los residuos del beneficio de la agroindustria, la disposición de los residuos puede llegar a ser un problema ambiental, teniendo en cuenta que en muchos casos se vierten a cuerpos de agua, por lo cual los microorganismos presentes van a hacer una demanda mayor de oxígeno para su descomposición, y generan de esta manera asfixia de la biota acuática (Álvarez *et al.*, 2011). En otros casos los residuos se dejan descomponer sobre el suelo de manera no controlada, y pueden producir problemas fitosanitarios y contaminación cruzada, ya que estos residuos contienen proteínas y azúcares, que pueden ser fermentables en los cuerpos de agua, considerando además que tienen un alto contenido de taninos, alcaloides y polifenoles, que son de difícil degradación biológica (Novita, 2016). Se han propuesto varias opciones para la disposición final de los coproductos del beneficio del café, tanto como sustrato para el cultivo de hongos, como *Pleurotus*, donde como sustrato mejora la producción de enzimas extracelulares; o bien, como alimento para ganado incorporándolo como complemento en porcentajes del 8 al 15 % (Das y Venkatachalapathy, 2016). Aunque el uso directo de los coproductos del café para alimentar animales no es recomendable por los factores antifisiológicos y antinutricionales, como los taninos y la cafeína (Esquivel y Jiménez, 2012).

La composición de los coproductos es muy variable, ya que depende de la variedad y condiciones de cultivo. Una composición promedio de algunos componentes fenólicos en estos coproductos comprenden: ácido clorogénico (42.2 %), epicatequina (21.6 %), ácido isoclorogénico I (5.7 %), ácido isoclorogénico II (19.3 %), ácido isoclorogénico III (4.4 %), catequina (2.2 %), rutina (2.1 %), ácido protocatéquico (1.6 %) y ácido ferúlico (1.0 %) (Ramírez Martínez, 1988). La TABLA 1 muestra los principales componentes de la pulpa de café obtenida durante el beneficio del fruto.

Tabla 1. Composición química de la pulpa de café (adaptada de Janissen y Huynh, 2018)

| Compuesto        | % (b.s.)  |
|------------------|-----------|
| Polifenoles      | 1.5-2.9   |
| Azúcares totales | 4.1       |
| Proteínas        | 4.0-13.3  |
| Lignina          | 17.5-19.3 |
| Lípidos          | 1.7-2.5   |

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| Celulosa               | 18.0-63   |
| Fibra total            | 18.0-60.5 |
| Cenizas                | 6.0-10.0  |
| Taninos                | 1.8-9     |
| Carbohidratos          | 44-89     |
| Azúcares reductores    | 12.4      |
| Azúcares no reductores | 2.0       |
| Cafeína                | 1.2-1.5   |
| Ácido clorogénico      | 1.6       |

El amplio consumo del café a nivel mundial es más que conocido, lo cual consecuentemente genera residuos orgánicos, tanto durante el proceso o beneficio como en el consumo de la bebida durante su preparación. Este trabajo tiene como objetivo revisar las principales metodologías para la extracción de compuestos bioactivos, a partir de los coproductos del beneficio (pulpa, mucílago, cascarrilla) del café de manera particular en la Frailesca, Chiapas, como alternativa para su integración al proceso de economía circular, ya que estos compuestos son utilizados como antioxidantes naturales en la industria de los alimentos.

## 1. Beneficio del café en la Frailesca

En la Frailesca producen café, generalmente de altura. Esta región se ubica en la zona sureste de la sierra y se caracteriza porque abundan comercios dedicados al molido y tostado de café, principalmente en Ángel Albino Corzo y la región de Custepec en la Concordia (SAGARPA, 2019).

Tabla 2. Producción de café en la Frailesca (adaptada de SAGARPA, 2019)

| Municipio               | Superficie sembrada (Ha) | Superficie cosechada (Ha) | Volumen de producción (t) | Rendimiento (t/Ha) |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|
| Villaflores             | 893                      | 888                       | 612.72                    | 0.69               |
| Villa Corzo             | 4641                     | 4037                      | 3835.15                   | 0.95               |
| Ángel Albino Corzo      | 7451                     | 4730                      | 4635.4                    | 0.98               |
| La Concordia            | 8340                     | 7710                      | 7478.7                    | 0.97               |
| Montecristo de Guerrero | 4182                     | 3485                      | 3275.9                    | 0.94               |

### 1.1 Descripción de las fases del sistema producto café

El café es un cultivo de gran importancia social, al ser una de las mayores fuentes generadoras de empleo en el medio rural, en particular en las comunidades de alta marginación enclavadas en las zonas serranas, donde muchas familias dependen de este cultivo y de la cosecha del fruto, como lo es la región denominada Frailesca, en Chiapas. Aquí el cultivo de maíz ha sido objeto de varias investigaciones para hacerlo más eficiente y sustentable. Propuestas como la agricultura de conservación

(prácticas de manejo y uso de suelo con técnicas agroecológicas como labranza mínima y cero, uso racional de insumos para mejorar los procesos ecológico y las interacciones suelo-agua-planta) con el fin de tener una distribución más eficiente de los recursos ambientales buscando una producción sostenible a mediano plazo (Guevara-Hernández *et al.*, 2018).

El cultivo de café empieza en los viveros de la región y cuando las plantas alcanzan de 15 a 20 cm de alto (en aproximadamente 6 meses), pueden ser trasplantadas a su lugar definitivo. La floración ocurre en el mes de mayo y en pocos días, por lo que se lleva un registro que permite monitorear el desarrollo del fruto y tener una idea del rendimiento del corte, después de 32 semanas, hasta la maduración, que en el caso de la Frailesca sucede en los meses de diciembre a marzo, dado que no todos los frutos maduran al mismo tiempo, se pueden realizar dos o tres recolecciones, según el estado de madurez de los frutos, una en el mes de diciembre, seguida por la de enero y una más a inicios de marzo. Lo más importante como comunidad es la cosecha, en donde la participación de la familia se organiza con un líder experimentado, el padre o la madre, que conoce la propiedad y anima a los jóvenes y niños a que hagan bien el trabajo, ya que, si se cultivan cuidadosamente las semillas de café, se generan ingresos, que permiten reactivar la economía local. La cereza se reúne en los tenates y se concentra en costales que se llenan poco a poco, se amarran y se sacan al camino de terracería, en un camión de carga, si la finca cuenta con uno, hasta juntar toda la cosecha. Aquí el trabajo de las mujeres es central tanto en la cosecha como en la eliminación de frutos verdes, sobre-madurados o con defectos, para garantizar la calidad y pureza del buen café (FIGURA 1).

Figura 1. Cosecha de café en la región Frailesca





Después de la recolección del grano se continúa con los procesos de poscosecha, donde se generan coproductos que contienen importantes compuestos bioactivos. La selección de granos continúa donde estos procedimientos. Primero es el despulpado, que generalmente se lleva a cabo con ayuda de máquinas para quitar la cáscara y pulpa del fruto. Después, el fruto se deja algunas horas fermentando en tanques de plástico para eliminar el resto de mucílago que aún quedó pegado al grano de café, dependiendo de la temperatura ambiental, la madurez del café y el diseño de los tanques fermentadores, la fermentación dura entre 12 y 20 horas. Posteriormente, viene el lavado, que se realiza de manera manual, separando por densidad el grano más grande y pesado, destinando el de menor peso y calidad inferior, al mercado local. Una vez lavado el café, se extiende en patios de cemento para secarlo al sol, se mueve cada media hora para lograr una uniformidad en este proceso que se realiza con unas palas de madera adaptadas por los productores de la región, las cuales se denominan “rastrillos”. Durante la noche se recoge para evitar la humedad del sereno y a la mañana siguiente se vuelve a extender en el patio, o bien, se utilizan camas metálicas. La ventaja de las camas es que posibilita la circulación del aire en el café permitiendo un secado uniforme (FIGURA 2 y 3). Con el secado la humedad del grano llega hasta 10-12.5 %, porcentaje con el que se puede almacenar para evitar los ataques de hongos o adquirir olores y sabores indeseables.

Figura 2. Proceso del beneficio del café, desde la selección, despulpado, lavado y secado



Finalmente, en la comercialización ya existen cooperativas que buscan producir, beneficiar y vender el café a un precio más justo para los productores, fijado por el mercado internacional. Entre estas organizaciones destacan: Café Santa María de Jaltenango, ubicada en la Cuenca El Triunfo a más de 1,400 msnm. Agroindustrias Unidas de México S.A. de C.V., que es una empresa de compra y venta de café que exporta a varios países y además elige como proveedores a pequeños productores que no han adquirido algún crédito con los acaparadores. Beneficio Custepec S.A. de C.V., es una estructura descentralizada destinada al cultivo, procesamiento y comercialización de café, agrupando ya a 15 fincas que producen café de altura y realizan el beneficio de manera artesanal, sin olvidar el cumplimiento de los estándares de calidad para exportación. Es dentro de estas cooperativas donde la recolección de los coproductos con todos los pasos descritos del proceso de beneficio del café puede y debe ser llevada a cabo para su aprovechamiento. Aunque de acuerdo con Araiza Aguilar *et al.* (2018) la región Frailesca tiene 1,501.64 km<sup>2</sup> de tierras altamente aptas para la disposición de residuos sólidos municipales (aunque lejos de las zonas de generación de residuos), no hay motivo para que los residuos provenientes de la agroindustria se sumen a la disposición de más basura en estos rellenos.

Figura 3. Proceso del beneficio del café, desde la selección, despulpado, lavado y secado



Como previamente se mencionó, durante el proceso de beneficio del fruto se generan desechos, involucra el epicarpio y parte del mesocarpio del fruto, dentro de los que destacan: la pulpa, el mucilago y la cascarilla, que generalmente por falta de capacitación técnica, los productores, desconocen

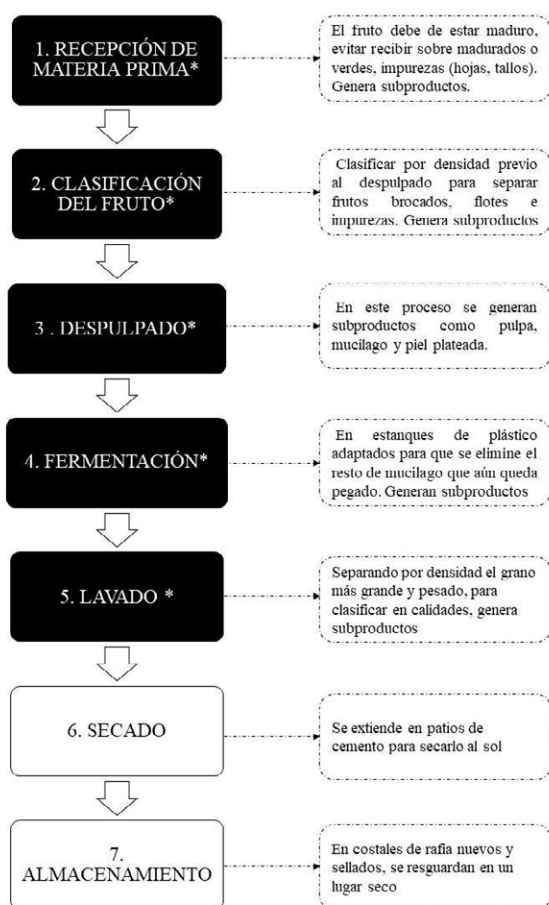


que estos subproductos son ricos en bioactivos, por los que son desechados, generando problemas ambientales (FIGURA 5). La FIGURA 5 muestra un diagrama de flujo del proceso en general indicando donde se generan residuos con potencial para extraer compuestos bioactivos.

Figura 4. Principales subproductos generados en el beneficio del café.



Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de beneficio del café





## 2. Tecnologías de extracción de compuestos de interés de subproductos del café

El proceso de extracción es el principal paso en los procesos industriales y el que genera el mayor gasto, arriba del 50 % del costo total del proceso. Considerando el incremento en la demanda por reducir la cantidad de tiempo, energía, costos y los solventes utilizados en los procesos convencionales de extracción, los métodos de extracción denominados “verdes” proponen el uso de solventes alternativos, para reducir el consumo de energía e impacto ambiental. Técnicas de extracción asistidas con ultrasonido, microondas, altas presiones hidrostáticas y campos de pulsos eléctricos han probado su efectividad para la mejorar la extracción de productos naturales (Li *et al.*, 2019).

### 2.1 Extracción

La extracción con solventes orgánicos es la técnica de separación de compuestos más utilizada, no solo a nivel laboratorio, sino también a escala industrial. La técnica consiste en que, a partir de una matriz sólida, aprovechando las diferencias de solubilidad de los componentes de la mezcla, estos son separados con el solvente adecuado; tradicionalmente, la extracción de estos compuestos de interés se ha realizado mediante técnicas convencionales donde se emplean solventes como: agua, metanol, etanol, acetato de etilo, entre otros (Reis Giada, 2013). Se debe tomar en cuenta la polaridad de los solventes, así como la afinidad de los compuestos de interés por estos sustratos, con el objetivo de aumentar el rendimiento de extracción, al final se obtiene un extracto acuoso, o bien, una oleorresina después de evaporar el solvente generalmente en un rotavapor.

El rendimiento de extracción reportado es muy variable, ya que depende primeramente de las condiciones del sustrato (tamaño de partícula, contenido de humedad), así como de las condiciones del proceso. Si es por maceración, la proporción de solvente: sustrato, temperatura, tiempo de maceración, solvente o mezcla de solventes. Si la extracción líquido:sólido utilizando el equipo Soxhlet, además de la relación solvente/sustrato, la temperatura y el tiempo de reflujo también son una variable.

#### 2.1.1 Extracción con solventes orgánicos

Utilizando isopropanol y agua, los mayores rendimientos de extracción se obtuvieron de mucílago (25 %), granos descartados (19 %) y cascarrilla (17 %) cuando se hizo un pretratamiento de estos coproductos con una mezcla de celulosas para mejorar el rendimiento de extracción (Murthy y Naidu, 2012a). Geremu *et al.* (2016) utilizaron tres solventes (80 % metanol, 80 % acetona y 80 % etanol en agua) para macerar pulpa de café, donde el usar acetona dio como resultado una mayor extracción de compuestos fenólicos y mayor capacidad antioxidante. Incluso el agua como solvente, extrae de las cascarrillas una gran cantidad de compuestos fenólicos con capacidad antioxidante (tiempos de maceración entre 4 y 8 minutos, 60 a 90 °C) (Serna-Jiménez *et al.*, 2018).

#### 2.1.2 Extracción con solventes eutécticos profundos

Otra opción son los solventes eutécticos profundos, una nueva clase de líquidos iónicos, pero que a diferencia de estos (los líquidos iónicos son sistemas compuestos principalmente por un anión y un catión), los solventes eutécticos profundos son sistemas formados por la mezcla de ácidos y bases de Lewis o Brønsted, que pueden contener una variedad de especies catiónicas y/o aniónicas (Smith *et al.*, 2014). Entre las mezclas de solventes eutécticos profundos probadas, la combinación de cloruro de colina y ácido láctico ha

sido la mejor para aislar e identificar ácido clorogénico, cafeína y teobromina como las principales moléculas bioactivas en mucílago de café (Ruesgas-Ramón y col., 2020).

### 2.1.3 Extracción con solventes supramoleculares

En los solventes supramoleculares, las moléculas que los constituyen interactúan entre sí a través de relaciones débiles como enlaces de hidrógeno, interacciones hidrófobas y de coordinación para formar nuevas entidades con propiedades novedosas y funciones que no se pueden deducir por una simple suma de las propiedades de las moléculas individuales (Ariga y Kunitake, 2006). A este respecto, dos solventes anfifílicos (ácido decanoico y hexanol) y dos dispersiones de solventes (tetrahidrofurano:agua y etanol:agua) fueron utilizados para la extracción de compuestos de alto valor agregado, de cáscara de café fresca y deshidratada. Los solventes supramoleculares a base de etanol: agua fueron más adecuados que los basados en tetrahidrofurano:agua para extraer cafeína, ya que el etanol como solvente prótico puede extraer la cafeína de manera más eficiente que el tetrahidrofurano (solvente aprótico), además, la constante dieléctrica del etanol es más alta que la del tetrahidrofurano (24 F/m y 7,5 F/m, respectivamente) (Torres-Valenzuela *et al.*, 2020).

### 2.2 Extracción asistida por microondas

Al aplicar calor por microondas a estos materiales la humedad dentro de las células se calienta y evapora ejerciendo presión sobre la pared celular, promoviendo un sobrecalentamiento interno y una diferencia de presión de vapor entre el interior y la superficie. Esta es la fuerza impulsora detrás del hinchamiento y estallido de las vacuolas y otros organelos celulares, facilitando la lixiviación del material intracelular al solvente circundante. Como resultado, dos fenómenos de transporte, transferencia de masa y calor (calentamiento volumétrico) van en la misma dirección, del interior al exterior de la matriz vegetal, donde la consecuente transferencia de humedad resulta en la deshidratación del material (Passos y Coimbra, 2017). En extractos acuosos, el calentamiento por microondas no aumentó la cantidad de compuestos bioactivos a partir de cascarillas de café, pero sí fue más eficiente en la extracción de compuestos con actividad antioxidante, donde el proceso de extracción óptimo para carotenoides fue de 900 watts de poder en el microondas por 5 minutos y 100 °C (Thaiphanit *et al.*, 2020). Por su parte, Saewan *et al.* (2020) utilizando mucílago de café reportan que los parámetros óptimos de extracción fueron 540 watts con una solución etanol al 41 % y una relación 22:1 de solvente-sustrato, para obtener 0.653 mg/mL de polifenoles como equivalente de ácido gálico.

### 2.3 Extracción asistida por campos de pulsos eléctricos

Los campos de pulsos eléctricos constituyen una técnica no térmica que aumenta la transferencia de masa debido a la permeabilización de las membranas celulares inducida por electroporación bajo el efecto de pulsos eléctricos de corta duración (desde nanosegundos a milisegundos) y campo eléctrico moderado, aumentando las tasas de extracción y rendimientos de diferentes componentes en matrices vegetales, con un bajo consumo energético y bajo impacto ambiental. En cascarilla de café, la extracción asistida por campos de pulsos eléctricos tiene un 20 % mayor de rendimiento de extracción para polifenoles que métodos convencionales de extracción, como la maceración (Barbosa-Pereira *et al.*, 2018).

## 2.4 Extracción asistida por ultrasonido

El término ultrasonido se refiere a ondas de sonido entre los 20 Hz a ca. 20 kHz, y puede ser dividido en dos zonas: ultrasonido de poder (20 kHz a 1 MHz), con aplicación en alimentos; y el ultrasonido de diagnóstico (>1 MHz), para usos médicos y de imagen (Kentish y Ashokkumar, 2011). La cavitación es el efecto del ultrasonido, resultando en cierto grado de erosión en el alimento, y es por esto que el uso del ultrasonido en los procesos de extracción se tiene una mayor penetración del solvente en el material celular, mejorando la transferencia de masa, para aumentar la liberación de compuestos por el rompimiento de las paredes celulares (Bermúdez-Aguirre *et al.*, 2011). En su aplicación para la extracción de compuestos de coproductos de café, Wen *et al.* (2019) reportan que la extracción asistida por ultrasonido tuvo mejores rendimientos de extracción de polifenoles totales, ácidos clorogénicos, y cafeína, además de mejorar la capacidad antioxidante del extracto, en comparación con las muestras control, sin ultrasonido, utilizando metanol-agua como solvente. Del mismo modo, la exposición a ultrasonido de extractos etanol-agua (50:50) de 40 a 60 minutos aumentó la extracción de compuestos fenólicos con alta actividad antioxidante a partir de cascarillas de café (Ribeiro *et al.*, 2019).

## 2.5 Extracción por fluidos supercríticos

Debido a la gran demanda de solventes por varias industrias, la búsqueda por solventes más amigables con el medio ambiente se enfoca hacia los fluidos supercríticos (trabajando a condiciones de presión, volumen y/o temperatura por arriba del punto crítico), de manera particular en los procesos de extracción. Los fluidos supercríticos añaden una nueva dimensión a los solventes líquidos convencionales, ya que el poder del solvente depende de su densidad, la cual puede ser modificada a las necesidades del proceso, cambiando la temperatura, presión y/o composición, incrementando los coeficientes de difusión, mejorando la extracción de compuestos de interés (Pereda *et al.*, 2008). Andrade *et al.* (2012) reportan que utilizando CO<sub>2</sub> con etanol tuvo el mejor rendimiento global de extracción a partir de cascarilla de café a bajas presiones (100 bar), que al utilizar únicamente CO<sub>2</sub>.

## 2.6 Uso de aceites vegetales como solvente

Un solvente alternativo ideal debe tener los requisitos listados en la TABLA 3. Para esto, las nuevas tecnologías como los métodos libres de solventes es un buen candidato. El uso de solventes verdes, como los bio-solventes, son una de las rutas alternativas más importantes para la sustitución de los solventes derivados del petróleo. El término “sustentable” o “verde” es utilizado para diferenciar los diferentes tipos de solventes incluyendo aquellos que son producidos de la materia prima de biomasa y los solventes petroquímicos inofensivos para el medio ambiente que son no tóxicos y biodegradables (Yara-Varón *et al.*, 2017). Los solventes de fuentes biológicas como los aceites vegetales no son volátiles, son seguros, fáciles de regenerar y económicamente viables, pero hay que considerar su poder disolvente y selectividad por los biocompuestos (Li *et al.*, 2014). La extracción total de polifenoles depende del tipo de aceite. El de aguacate, oliva, maíz y soya obtuvieron un valor relativamente alto de extracción de polifenoles (los aceites de canola, cacahuete, almendra, o chabacano, no). Además, la adición de compuestos anfífilos mejoraron la extracción (lecitina de soya>monooleato de glicerina>monoestearato de glicerol), de acuerdo con su hidrofobicidad (Li *et al.*, 2019).

En este contexto, los aceites vegetales utilizados como solventes pertenecen a la clase de bio-solventes los cuales tienen la ventaja de ofrecer un impacto positivo en el medio ambiente y la salud, como los listados en la *TABLA 3*. Los aceites vegetales son sistemas lipofílicos no polares cuya composición cambia considerablemente de acuerdo con su origen, calidad, y método con el cual son obtenidos, también se pueden aplicar al campo de la extracción como, por ejemplo, para obtener fitoquímicos bioactivos a partir de recursos naturales, sobre todo al ser combinados con tecnologías innovadoras como el ultrasonido, microondas o extracción supercrítica con CO<sub>2</sub> (Yara-Varón *et al.*, 2017).

**Tabla 3. Requisitos para un solvente alternativo (adaptado de Yara-Varón *et al.*, 2017)**

|                                          |
|------------------------------------------|
| No emitir compuestos volátiles orgánicos |
| Ser de baja toxicidad para humanos       |
| Tener limitado impacto ambiental         |
| Obtenerse de fuentes renovables          |
| Tener un alto poder disolvente           |
| Fácil de recuperar                       |

De este modo, si pensamos que las condiciones de las cooperativas cafetaleras de la Frailesca no se pueden permitir una gran inversión en equipo y tecnologías de extracción, el utilizar aceites comestibles puede ser la opción más viable en la extracción de compuestos bioactivos. La aplicación de estos aceites va desde la gastronomía (aceites aromatizados) hasta su uso en la generación de aceites reestructurados que pueden ser utilizados como reemplazo de grasa saturadas en alimentos procesados, que además de reducir el contenido de energía calórica, ya estarían incorporando compuestos antioxidantes naturales, lo que mejoraría su desempeño en el proceso, es decir, reducir la autooxidación, y alargar la vida de anaquel.

### 3. Conclusión

La economía circular implica muchas oportunidades para varios sectores de la agroindustria, puede ayudar a paliar el problema de desperdicio de alimentos, aumentar la eficiencia en el uso de recursos y fomentar el crecimiento de los mercados locales. Además de incrementar la cadena de valor de los productos, donde lo ideal sería que los pequeños productores asociados en cooperativas obtuvieran parte de estos beneficios. Ya que están bien documentados y estudiados los componentes bioactivos de los coproductos del café, es importante su extracción para su aprovechamiento como aditivos en la industria alimentaria. El método de extracción define en mucho los compuestos a extraer, pero unos implican solventes que por ser inflamables no son de fácil manejo, por lo que el usar aceites comestibles parece ser la mejor opción para generar productos con un mayor valor agregado a partir de parte de los coproductos de la agroindustria, en particular del beneficio del café.

**Contribuciones de los autores:** El autor Marco Antonio Santiago-Ruiz agradece al CONACYT la beca para cursar sus estudios dentro del programa consolidado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica en el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (Ref. 002022).

**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

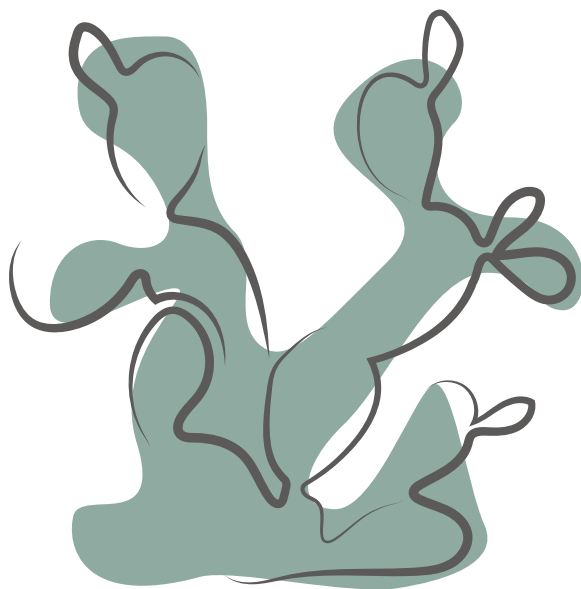
**Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## 4. Referencias

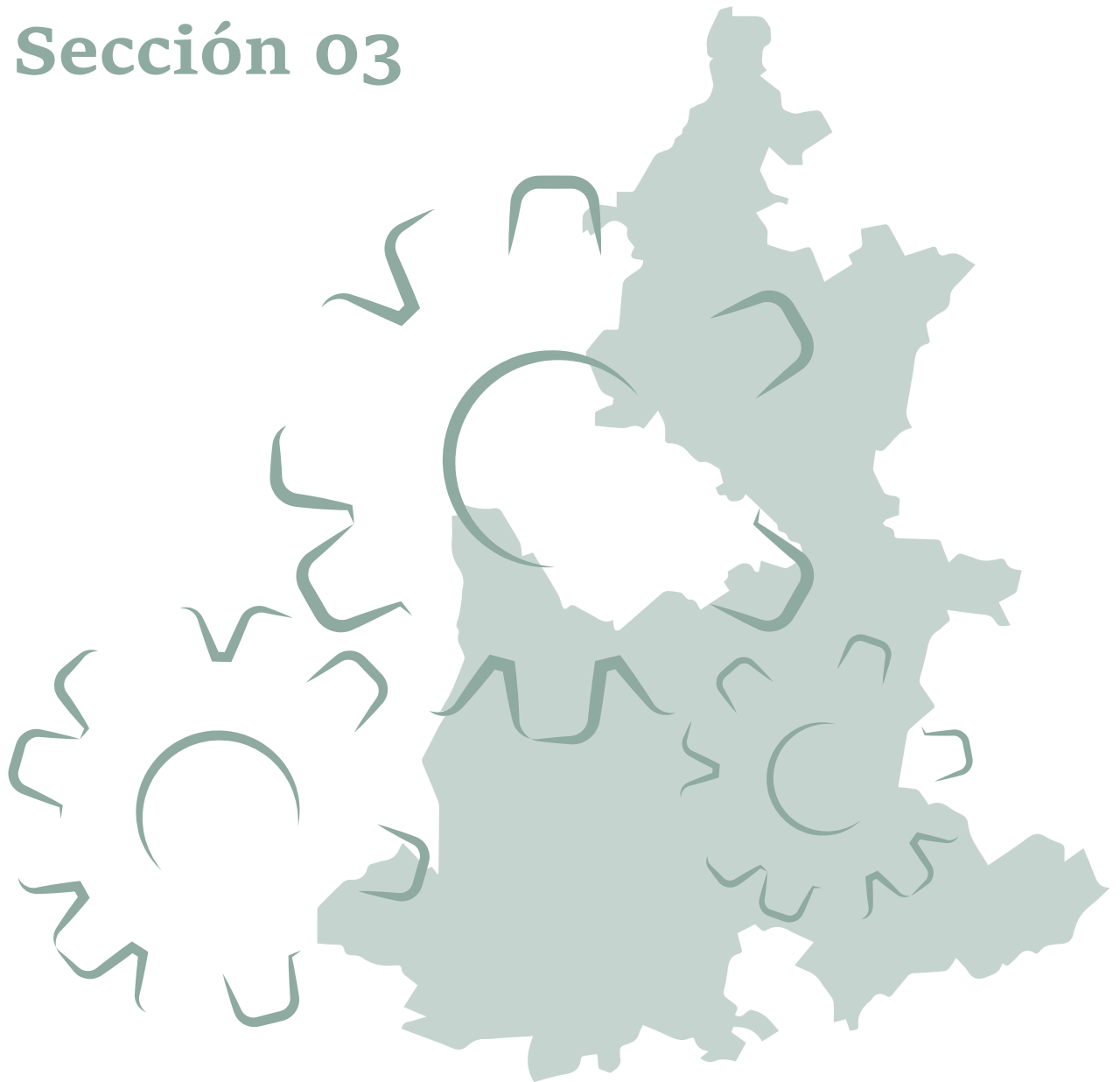
- Álvarez, J., Hugh, S., Cuba, N., y Loza-Murguía, M. (2011). Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales del pre beneficiado de café (*Coffea arabica*) implementado en la comunidad Carmen Pampa provincia Nor Yungas del Departamento de La Paz. *Journal of the Selva Andina Research Society Research Society* 2, 34-42.
- Andrade, K.S., Gonçalves, R.T., Maraschin, M., Ribeiro-do-Valle, R.M., Martínez, J., y Ferreira, S.R.S. (2012). Supercritical fluid extraction from spent coffee grounds and coffee husks: Antioxidant activity and effect of operational variables on extract composition. *Talanta* 88, 544-552.
- Araiza Aguilar, J.A., Nájera Aguilar, H.A., Gutiérrez Hernández, R.F., y Rojas Valencia, M.N. (2018). Emplacement of solid waste management infrastructure for the Frailesca Region, Chiapas, México, using GIS tools. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 21(3), 391-399.
- Ariga, K., y Kunitake, T. (2006). *Supramolecular Chemistry – Fundamentals and Applications*. Springer-Verlag, Berlin.
- Avraamidou, S., Baratsas, S.G., Tian, Y., y Pistikopoulos, E.N. (2020). Circular Economy - A challenge and an opportunity for Process Systems Engineering. *Computers & Chemical Engineering* 133, 106629.
- Barbosa-Pereira, L., Guglielmetti, A., y Zeppa, G. (2018). Pulsed electric field assisted extraction of bioactive compounds from cocoa bean shell and coffee silverskin. *Food and Bioprocess Technology* 11, 818-835.
- Bermúdez-Aguirre, D., Mobbs, T., y Barbosa-Cánovas, G.V. (2011). Ultrasound applications in food processing. En: *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing* (H. Feng, G.V. Barbosa-Cánovas, y J. Weiss, eds.), pp. 65-106. Springer.
- Cury R., K., Aguas M., Y., Martínez M., A., Olivero V, R., y Chams Ch., L. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal* 9, 122-132.
- Das, A., y Venkatachalapathy, N. (2016). Profitable exploitation of coffee pulp- a review. *International Journal of Applied and Natural Sciences* 5, 75-82.
- Esquivel, P., y Jiménez, V.M. (2012). Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food Research International* 46, 488-495.
- Geremu, M., Tola, Y.B., y Sualeh, A. (2016). Extraction and determination of total polyphenols and antioxidant capacity of red coffee (*Coffea arabica* L.) pulp of wet processing plants. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 3, 25-26.
- Guevara-Hernández, F., Delgado-Ruiz, F., La O.-Arias, M.A., Rodríguez-Larramendi, L.A., Ortiz-Pérez, R., Delgado-Ruiz, J.Á., Venegas-Venegas, J.Á., y Pinto-Ruiz, R. (2018). Análisis comparativo energético-económico del agroecosistema maíz bajo prácticas convencionales y de conservación en la región Frailesca, Chiapas, México. *Revista de la Facultad de Agronomía* 35, 343-364.
- Janissen, B., y Huynh, T. (2018). Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 128, 110-117.
- Karmee, S.K. (2018). A spent coffee grounds based biorefinery for the production of biofuels, biopolymers, antioxidants and biocomposites. *Waste Management* 72, 240-254.
- Kentish, S., y Ashokkumar, M. (2011). The physical and chemical effects of ultrasound. En: *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing* (H. Feng, G.V. Barbosa-Cánovas, y J. Weiss, eds.), pp. 1-12. Springer.
- Li, Y., Bundeasomchok, K., Rakotomanomana, N., Fabiano-Tixier, A.-S., Bott, R., Wang, Y., y Chemat, F. (2019). Towards a zero-waste biorefinery using edible oils as solvents for the green extraction of volatile and non-volatile bioactive compounds from rosemary. *Antioxidants* 8, 140.
- Li, Y., Fabiano-Tixier, A.S., Ginies, C., y Chemat, F. (2014). Direct green extraction of volatile aroma compounds using vegetable oils as solvents. *LWT-Food Science and Technology* 59, 724-731.
- Murthy, P. S., y Naidu, M. M. (2012a). Recovery of phenolic antioxidants and functional compounds from coffee industry by-products. *Food and Bioprocess Technology* 5, 897-903.
- Murthy, P.S., y Naidu, M.M. (2012b). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition – A review. *Resources, Conservation and Recycling* 66, 45-58.
- Naranjo, M., Vélez, L.T., Rojano, B.A. (2011). Actividad antioxidante de café colombiano de diferentes calidades. *Revista Cubana de Plantas Medicinales* 16, 164-173.



- Novita, E. (2016). Biodegradability simulation of coffee wastewater using instant coffee. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 9, 217-229.
- Orejuela, L. M. (2019). La economía circular, la tecnología cero desperdicios, la bioeconomía, la biorrefinería y el desarrollo sostenible. *ÑAWPAY Revista Técnica Tecnológica* 1, 38-47.
- Passos, C.P., y Coimbra, M.A. (2017). Microwave extraction of bioactive compounds from industrial by-products. En *Microwave Chemistry*, (G. Cravotto y D. Carnaroglio, eds.), pp. 302-333. De Gruyter.
- Pereda, S., Bottini, S.B., y Brignole, E.A. (2008). Fundamentals of supercritical fluid technology. En: *Supercritical Fluid Extraction of Nutraceuticals and Bioactive Compounds* (J.L. Martínez, ed.), pp 1-24. CRC Press, Boca Raton.
- Ramirez Martinez, J.R. (1988). Phenolic compounds in coffee pulp: Quantitative determination by HPLC. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 43, 135-144.
- Reis Giada, M.L (2013). Food phenolic compounds: main classes, sources and their antioxidant power. En: *Oxidative Stress and Chronic Degenerative Diseases – A Role for Antioxidants* (J.A. Morales-González, ed.), 87-112. IntechOpen.
- Ribeiro, E.F., Luzia, D.M.M., y Jorge, N. (2019). Antioxidant compounds extraction from coffee husks: the influence of solvent type and ultrasound exposure time. *Acta Scientiarum. Technology* 41, e36451–e36451.
- Ruesgas-Ramón, M., Suárez-Quiroz, M.L., González-Ríos, O., Baréa, B., Cazals, G., Figueroa-Espinoza, M.C., y Durand, E. (2020). Biomolecules extraction from coffee and cocoa by- and co-products using deep eutectic solvents. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 100, 81-91.
- Saewan, N., Vichit, W., y Jimtaisong, A. (2020). Optimization of phenolic extraction from coffee by-product using response surface methodology and their antioxidant activities. *Food and Applied Bioscience Journal* 8, 14-26.
- SAGARPA (2019). Programa de Seguridad e Inocuidad Alimentaria. Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. Vigilancia Epidemiológica en el Cultivo del Cafeto. Informe de Evaluación 2016-2018. Disponible en: URL: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/525454/Informe\\_Final\\_PSLA\\_2018\\_Chiapas\\_VE\\_Cafeto.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/525454/Informe_Final_PSLA_2018_Chiapas_VE_Cafeto.pdf) [fecha de acceso: 30/11/2020].
- Sauvé, S., Bernard, S., y Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development* 17, 48-56.
- Serna-Jiménez, J.A., Torres-Valenzuela, L.S., Martínez-Cortínez, K., y Hernández-Sandoval, M.C. (2018). Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. *Revista ION* 31, 37-42.
- Smith, E.L., Abbott, A.P., y Ryder, K.S. (2014). Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical Reviews* 114, 11060-11082.
- Thaiphani, S., Wedprasert, W, y Srabua, A. (2020). Conventional and microwave-assisted extraction for bioactive compounds from dried coffee cherry peel by-products and antioxidant activity of the aqueous extracts. *ScienceAsia* 46S, 12-18.
- Torres-Valenzuela, L.S., Serna-Jiménez, J.A., y Martínez, K. (2020). Coffee by-products: Nowadays and perspectives. En *Coffee - Production and Research* (D.T. Castanheira, ed.). Intechopen.
- Wen, L., Zhang, Z., Rai, D., Sun, D.-W., y Tiwari, B. K. (2019). Ultrasound-assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from coffee silverskin: Impact on phenolic content, antioxidant activity, and morphological characteristics. *Journal of Food Process Engineering* 42, e13191.
- Yara-Varón, E., Li, Y., Balcells, M., Canela-Garayoa, R., Fabiano-Tixier, A.-S., y Chemat, F. (2017). Vegetable oils as alternative solvents for green oleo-extraction, purification and formulation of food and natural products. *Molecules* 22, 1474.

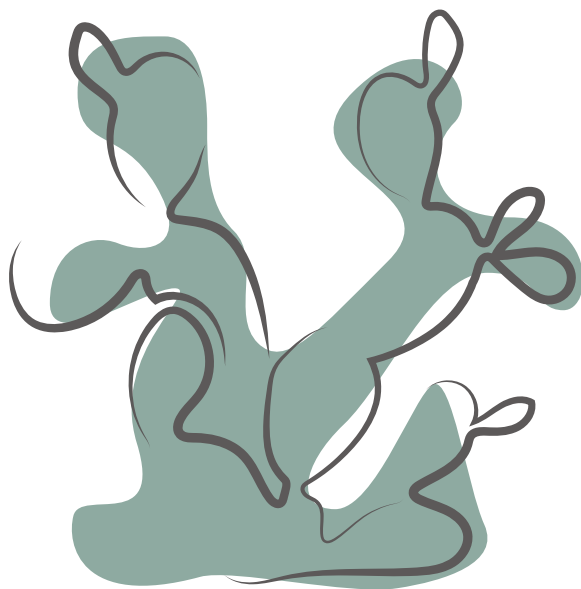


## Sección 03



## Procesamiento





# Diseño, formulación y evaluación bromatológica-sensorial de bebida a base de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) y pitaya (*Stenocereus pruinosus*)

Navarro-Toscano Benjamín<sup>1</sup>  
Balbuena-Jaime Dulce G.<sup>2</sup>  
Ochoa-Velasco Carlos E.<sup>3</sup>  
Benítez-Rojas Alfredo C.<sup>1 \*</sup>

<sup>(1)</sup> Facultad de Biotecnología, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla Pue., México.

<sup>(2)</sup> Facultad de Nutrición, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla Pue., México.

<sup>(3)</sup> Departamento de Bioquímica y Alimentos, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla Pue, México.

\* Correspondencia

Benítez-Rojas A. C. 0000-0001-5333-3069,  
alfredocesar.benitez@upaep.mx; Tel: +52 222  
2299400 Ext. 7774

La desnutrición es uno de los problemas de salud más graves que afecta a la infancia de los países en desarrollo. En México, se estima que más de un 60 % de los menores de cinco años padecen desnutrición leve, moderada o severa. La desnutrición como parte de las injusticias sociales representa desde hace tiempo, un desafío para la humanidad que hay que resolver. Lo anterior se lograría por una parte entendiendo las causas que generan esta situación, y por otra, a través de la aplicación de la ciencia y tecnología de alimentos que permitan el uso eficiente de los recursos de nuestro país. Por otro lado, México es poseedor de una gran riqueza de alimentos endémicos con altos estándares nutrimentales tales como el amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), y la pitaya (*Stenocereus griseus*) cuyas propiedades ya han sido ampliamente reportadas. En este trabajo se llevó a cabo el diseño, formulación y evaluación bromatológico-sensorial de una bebida a base de estos alimentos con la esperanza de que la bebida contribuya en algún momento al abatimiento gradual de dicho problema. Para formular la bebida se estudió la capacidad de suspensión de diferentes tamaños de partícula de harina de amaranto tanto en agua como en una crema obtenida por trituración y posterior filtración del fruto. La bebida se caracterizó por espectroscopía FTIR mostrando perfiles espectrales similares entre la bebida y la leche entera, lo cual sugiere un contenido y comportamiento molecular similares entre ellas, el contenido proteico por el método de Biuret arrojó un valor de  $4.02 \pm 0.03$  g/100mL. La formulación final se desarrolló adicionando aditivos de sabor idénticos a los naturales y se evaluó con pruebas sensoriales con escala hedónica de 5 puntos con jueces no entrenados. El tratamiento térmico se diseñó para reducir la carga microbiana hasta un

valor calculado de  $N=10^3$  UFC/mL proponiendo una metodología alterna para la evaluación de su eficiencia mediante el uso del factor Nabla. La bebida aporta un nivel proteico 4 veces mayor al de las bebidas comerciales de su tipo actualmente disponibles y el grado de aceptación sensorial alcanzó un 49.02 % a quienes les gustó o les gustó mucho.

**Palabras clave:** Amaranto, bebidas, pseudocereales, desnutrición, pitaya.

## Introducción

Cuando se piensa en el término desnutrición, lo primero que imaginamos es la falta de alimentos y el hambre, las imágenes que probablemente vengan a nuestra mente son las de niños extremadamente delgados que apenas tienen fuerza para sostenerse en pie. Sin embargo, la desnutrición que está detrás de la muerte de 8.000 niños cada día (casi 3 millones al año) es el resultado de un proceso complejo (González & Haro, 2013). Un niño que sufre desnutrición no solo ha tenido una cantidad insuficiente de alimentos, sino que, además, lo que ha ingerido no tenía los nutrientes necesarios para su desarrollo. Una atención poco adecuada o la acumulación de enfermeda-

des infecciosas son elementos que siempre están presentes en esta misma (Vásquez *et al.*, 1999). América Latina ha experimentado avances en la erradicación del hambre y la desnutrición durante las últimas décadas, con una disminución considerable del número de infantes con desnutrición. Sin embargo, la región cuenta con una oferta excedentaria de alimentos para el consumo humano, se estima que el 10.2 % de la población no cuenta con ingresos suficientes para cubrir sus requerimientos nutricionales mínimos, 12.5 % de los menores de cinco años tiene desnutrición crónica, 3.8 % sufre desnutrición global y 1.5 % desnutrición aguda (Paraje, 2008). Al mismo tiempo, 34 millones de personas sufren una baja nutrición, el 47.7 % de los niños menores de 5 años padece anemia y el 49.8 %, aproximadamente 1.3 millones, tiene desnutrición crónica. A pesar de que la región produce suficientes alimentos para satisfacer las necesidades de todos sus habitantes, el problema central de la inseguridad alimentaria sigue siendo el mismo: la falta de acceso a los nutrientes, una dieta poco variada, la alta vulnerabilidad a los desastres naturales y la desigualdad social. El riesgo de mortalidad en infantes indígenas causado por diarrea, desnutrición o anemia es tres veces mayor comparado con la población no indígena (Gómez, 2019).

La familia *Amaranthaceae* tiene descritos 174 géneros y alrededor de 2050 a 2500 especies. El género *Amaranthus* cuenta con alrededor de 70 especies y 40 de estas son nativas del continente americano (Ortega *et al.*, 2017). Dado que existen diversas variedades, este trabajo se centró en la variedad *Amaranthus hypochondriacus*. La palabra amaranto proviene del griego “amarantos”. Este alimento, era parte de la dieta de civilizaciones precolombinas como los Incas, Aztecas y Mayas. Pero ante la conquista española, fue prohibida la siembra del amaranto a los indígenas por considerarse un alimento pagano. Su preservación se dio gracias a los cultivos de las comunidades pequeñas. Posee aminoácidos esenciales de alto valor biológico como son: lisina, triptófano y metionina. Se han descrito diferentes actividades biológicas de componentes aislados de amaranto como actividad antibacteriana, antitumoral, antioxidante, antiinflamatoria y antihipertensiva, demostrando que es una buena fuente de compuestos bioactivos (Carrillo, *et al.*, 2015). El amaranto que es producido en las regiones de Tlaxcala, Puebla, México y Ciudad de México posee diferentes características comparado con otras especies. En varios trabajos se han reportado datos de la composición química en materia cruda del *A. hypochondriacus* donde se destaca el excelente aporte proteico que brinda este pseudocereal, aproximadamente, el contenido de proteínas en los cultivos oscila entre 12.5 % a 16.0 % en base seca (Alfaro *et al.*, 1987; Bressani *et al.*, 1987; Imeri *et al.*, 1987). La calidad en el tipo de proteína que posee el amaranto se diferencia entre el trigo, maíz y arroz por la composición de lisina y de algunos aminoácidos sulfurados que lo componen (Bressani *et al.*, 1987) por lo que



el perfil de aminoácidos, en sus diferentes variedades, es superior en comparación con cereales o leguminosas. Respecto a la composición de los ácidos grasos que posee el *A. hypochondriacus* ayuda a determinar su valor nutricional, así como su utilidad biotecnológica y sus propiedades estabilizadoras, en dicho perfil de lípidos destaca la presencia de ácidos grasos mono y poliinsaturados esenciales como los ácidos oleico, linoleico y linolénico (Jahaniaval *et al.*, 2000; Venskutonis & Kraujalis, 2013).

La pitaya roja o *Stenocereus pruinosus* es una especie nativa de México. Se han encontrado vestigios en Tehuacán, Puebla que demuestran que se ha utilizado desde hace aproximadamente 6500 a 4500 años (Parra *et al.*, 2008). Entre sus características más destacadas se encuentran su sabor dulce, además de que se han reportado efectos medicinales y un gran aporte nutricional siendo un alimento funcional para ser integrado en la alimentación. Existen de 22 a 24 especies de pitayas que se encuentran en el género *Stenocereus* (Rosales *et al.*, 2009). Dado que existen diversas frutas de esta misma especie, la investigación se centró en la pitaya roja o “espina amarilla”, otro nombre con el que puede encontrarse (especie *pruinosus*). La pitaya roja, posee un contenido promedio de fibra dietética de 1 %, aportando beneficios intestinales por la estimulación intestinal que promueve. Aunque su pulpa no contiene una cantidad significativa de proteína y de lípidos, esto no implica que deje de ser alimento funcional, ya que, aunque no contiene estos macronutrientes en abundancia, sí posee concentraciones favorables de vitamina C (0.85 a 1.7 %) lo que le confiere un beneficio antioxidante. La pitaya es rica en azúcares (10-13 °Brix). Además, contiene minerales como, hierro (22.8 mg/kg), cobre (9.67 mg/kg) y zinc (7.04 mg/kg). Por otro lado, el color rojo que posee la pitaya roja está dado por un componente conocido como betacianina (2.6 mg/g de materia seca). Este componente, participa en mecanismos relacionados a la prevención de cáncer ya que inhibe la oxidación de las membranas celulares, evita el estrés oxidativo (García *et al.*, 2013; Georgé *et al.*, 2005; Pérez *et al.*, 2016; Quiroz *et al.*, 2018). Esta fruta puede ser consumida en preparaciones de agua fresca, helados (base láctea) o nieves (base acuosa) y paletas de hielo. Actualmente, la industria tecnológica ha introducido el alimento en licores, gelatinas, mermeladas, refrescos, bebidas no gaseosas y otros. Las características físicas y sensoriales de la fruta permanecen estables los primeros tres meses después de su producción. Una desventaja que ocasionan los tratamientos térmicos industriales y el contacto con los rayos solares una vez cortada la fruta, es que existe una pérdida significativa de los polifenoles, betalainas y por lo tanto de su actividad antioxidante (García *et al.*, 2016; García *et al.*, 2013). Los estados que tienen la mayor producción en México son Oaxaca y Puebla (Rojas *et al.*, 2015). El presente trabajo propone el desarrollo de una bebida con potencial funcional a base de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) y pitaya (*Stenocereus pruinosus*) que buscará, colocarse en el futuro, como un complemento nutricional, así como un coadyuvante en el tratamiento de la desnutrición infantil.

## 1. Materiales y Métodos

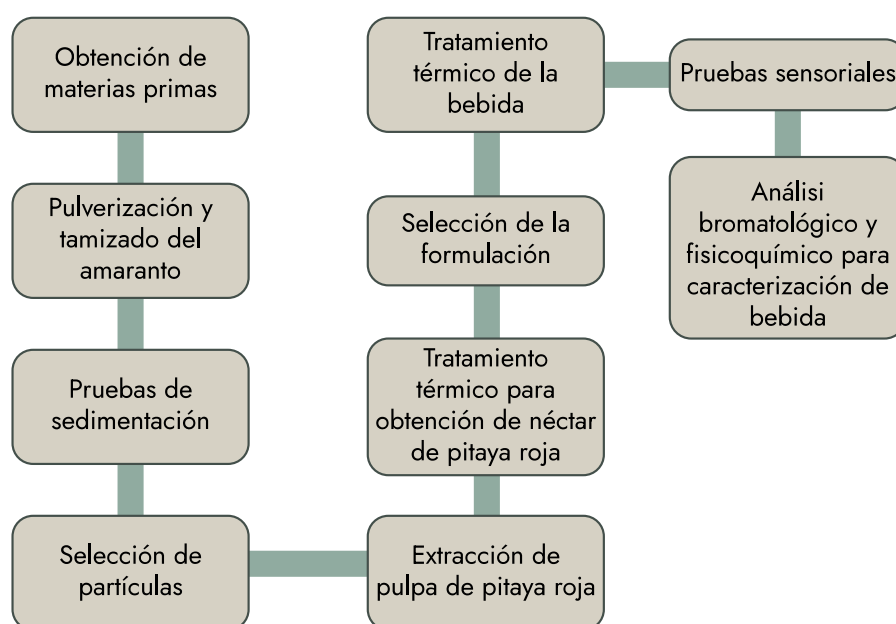
### 1.1 Material biológico

Amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), pitaya roja (*Stenocereus pruinosus*). Ambos obtenidos de la Central de Abastos de la ciudad de Puebla.

### 1.2 Diseño y formulación de la bebida

La bebida fue desarrollada usando el diagrama de flujo mostrado en la FIGURA 1.

Figura 1. Esquema general del proceso del desarrollo de la bebida en este trabajo



#### 1.2.1 Obtención de harina de amaranto

Para la pulverización del amaranto reventado se utilizó un equipo Thermomix TM31 ®.

#### 1.2.2 Tamizado

Para la discriminación del tamaño de partícula se utilizó un equipo MEINZER II SIEVE SHAKE, donde se montaron diferentes tamaños de mallas: 600, 425, 300, 180, 150, 75 y 53  $\mu\text{m}$ . El tiempo de agitación fue de 30 minutos.

#### 1.2.3 Pruebas de sedimentación

Una vez discriminados los diferentes tamaños de partícula, se realizaron pruebas de sedimentación. En diferentes probetas se montaron suspensiones al 1 %, 2.5 % y 5 % en 100 ml. Se dejaron reposar por al menos 4 horas y se midió la cantidad de sedimentación, aquellas que alcanzaron valores de sedimentación menores a 0.5 mL se dejaron indefinidamente hasta alcanzar este valor, reportando el tiempo requerido para llegar.

### 1.2.3 Formulación final

La incorporación de la pitaya se realizó mediante la preparación de un néctar del fruto por medio de extracción de pulpa, retirando los residuos sólidos por filtración estándar (colador) obteniéndose una suspensión estable con una concentración de SS (sólidos solubles) de 12-13° Brix.

### 1.2.4 Tratamiento térmico

Para este trabajo se optó por aplicar el concepto de Factor Nabla (V) que es utilizado en la industria biotecnológica y farmacéutica para evaluar la eficiencia del tratamiento térmico en función del tiempo y la temperatura aplicados a la esterilización de los medios de cultivo cuyos requerimientos de destrucción de microorganismos son más estrictos ya que, lo que se busca, es una esterilización total del medio (Ertola Rodolfo, 2006; Hoskins, 1979; Kirk & Hambleton, 1981; Koribilli, Aravamudan, & Varadhan, 2011). Básicamente el método consiste en aplicar el tratamiento térmico al líquido y posteriormente evaluar su eficiencia usando valores cinéticos de destrucción térmica calculados a partir del microorganismo más termorresistente presente en el medio o como fue el caso del presente trabajo, aquellos microorganismos patógenos que se busca destruir. Así pues, el término Nabla o Factor Nabla permite demostrar la magnitud de la disminución del número de organismos viables realizado por métodos de esterilización. Gran parte de la destrucción de los microorganismos se presenta en la etapa del calentamiento y enfriamiento. Lo que se busca es calcular la cantidad de esporas (o microorganismos en estado vegetativo) que son eliminados durante ambos períodos (Deindoerfer & Humphrey, 1959). La bebida fue sometida a un tratamiento térmico de 85 °C durante 90 segundos en vaso de precipitados acondicionado para simular un fermentador, la recolección de datos se realizó usando un sensor de temperatura WRT-BTA, Vernier®.

## 1.3 Métodos analíticos (bromatológicos y fisicoquímicos)

La determinación de proteínas se realizó usando la metodología de Biuret. Se tomó 1 mL de la bebida más 2 mL de reactivo de Biuret agitando por 5 minutos en Vortex para su posterior lectura en espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10 Bio, Thermo®) a 540 nm. La curva de calibración se realizó con albúmina de suero bovino (Merck, núm. Cat. 10711454001). La determinación de sólidos solubles totales (°Brix) se realizó por lectura directa en un refractómetro ATAGO® 3810 depositando aproximadamente 150 µL de la bebida, calibrando a 0° Brix con agua destilada.

## 1.4 Métodos microbiológicos

La determinación de bacterias mesófilas aerobias (BMA), coliformes totales, mohos y levaduras se realizó por cuenta en placa preparando diluciones y hasta  $10^{-3}$  sembrando en agar cuenta estándar, agar rojo bilis-violeta y papa-dextrosa incubando de 24-30 h antes de la lectura de placas para BMA y coliformes totales y de 3 a 7 días para mohos y levaduras.

## 1.5 Método espectroscópico

Las muestras se corrieron en un espectrómetro Vertex 70 (Bruker®) a temperatura ambiente en la región del infrarrojo mediano, de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ . Los datos se recolectaron en el modo de reflectancia total atenuada (ATR) a una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$  con 120 escaneos. Cada espectro se obtuvo por triplicado y se promedió antes del análisis. Los espectros se procesaron en Origin-Pro 2016®.

## 1.6 Análisis Sensorial

Se utilizó una escala hedónica de 5 puntos con panelistas no entrenados (estudiantes de diversas carreras de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla entre 18 y 22 años). Se realizaron pruebas de aceptación ( $n=50$ ) y comparación ( $n=100$ ) basados en la metodología propuesta por Lawless (2012), Stone *et al.* (2012) y Watts *et al.* (1992).

## 1.7 Análisis estadístico y herramientas gráficas

Se utilizó el programa IBM SPSS Statistics 23, paquetería de Excel Microsoft 365® y Logger Pro® 3.16.1 para el cálculo de áreas bajo la curva y recolección de datos de temperatura.

# 2. Resultados y discusión

## 2.1 Diseño y formulación de la bebida

La *TABLA 1* muestra los rendimientos obtenidos después de la trituration de los granos de amaranto.

Tabla 1. Rendimiento de harina de amaranto en función al tamaño de partícula

| Tamaño de partícula<br>( $\mu\text{m}$ ) | Rendimiento ( %) |
|------------------------------------------|------------------|
| 841                                      | 4.7              |
| 250                                      | 15.3             |
| 149                                      | 34.8             |
| 105                                      | 9.2              |
| 75                                       | 12.1             |
| 53                                       | 23.9             |

Una vez obtenida la harina, se procedió a ensayar la estabilidad de las suspensiones formadas a diferentes concentraciones en sistema acuoso. La *TABLA 2* muestra los resultados del tiempo de sedimentación a concentraciones de 1, 5 y 10 % m/v.

Tabla 2. Tiempo de sedimentación de las suspensiones en función al tamaño de partícula y concentración.

| Concentración                        | 1 %           | 5 %  | 10 %  |
|--------------------------------------|---------------|------|-------|
| Tamaño de partícula<br>$\mu\text{m}$ | Tiempo (min.) |      |       |
| 841                                  | 2.4           | 6.43 | 26.1  |
| 250                                  | 2.4           | 9    | 29.34 |
| 149                                  | 3.2           | 11   | 22    |

|     |          |          |          |
|-----|----------|----------|----------|
| 105 | 3.21     | 5.47     | $\infty$ |
| 75  | $\infty$ | $\infty$ | $\infty$ |
| 53  | $\infty$ | $\infty$ | $\infty$ |

Para mejorar la experiencia sensorial se ensayaron diferentes aditivos de sabor (Sodexim®) a una concentración de 0.009 % de los que finalmente se seleccionó de manera empírica el sabor a “Sandía” para la versión final de la bebida.

### 2.1.1 Evaluación del tratamiento térmico: Cálculo de parámetros cinéticos de destrucción térmica para *Salmonella sp* y *Listeria sp*

Los datos de valores D usados fueron tomados del trabajo publicado por Murphy *et al.*, (2000) donde se reportan en medio líquido (peptona-agar 0.1 %) a temperaturas que van de los 55 a 70 °C. Con ellos se calcula la constante de

muerte térmica ( $k_d$ ) a cada temperatura ( $k_d=2.303/D$ ), el inverso de la temperatura absoluta y el logaritmo natural ( $\ln$ ) de  $k_d$  necesarios para poder obtener los valores de la constante de Arrhenius (A) y la energía de activación (Ea) de cada microorganismo. Partiendo de la ecuación (1) que relaciona la temperatura absoluta y la constante de muerte térmica ( $k_d$ ) en su versión linealizada (ecuación 2) pueden calcularse los parámetros buscados

$$k_d = A e^{-E_a/RT} \quad (1)$$

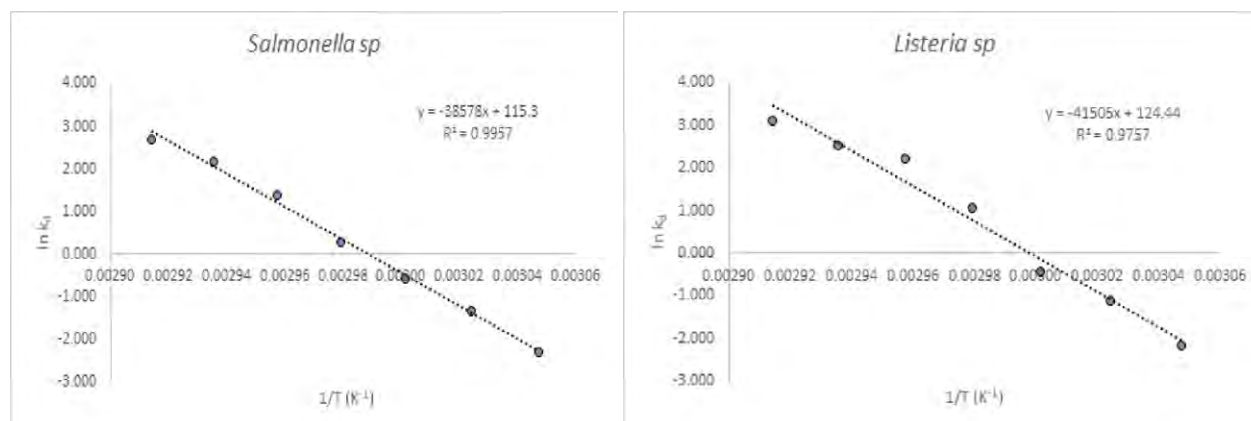
$$\ln k_d = -E_a/RT + \ln A \quad (2)$$

Se realiza la regresión lineal graficando  $\ln k_d$  vs  $1/T$  (FIGURA 2) usando  $R=8.314472 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$  para obtener los parámetros mostrados en la TABLA 3.

Tabla 3. Valores de la energía de activación (Ea), constante de Arrhenius (A) y factor Nabla calculados para *Salmonella sp* y *Listeria sp* en medio líquido

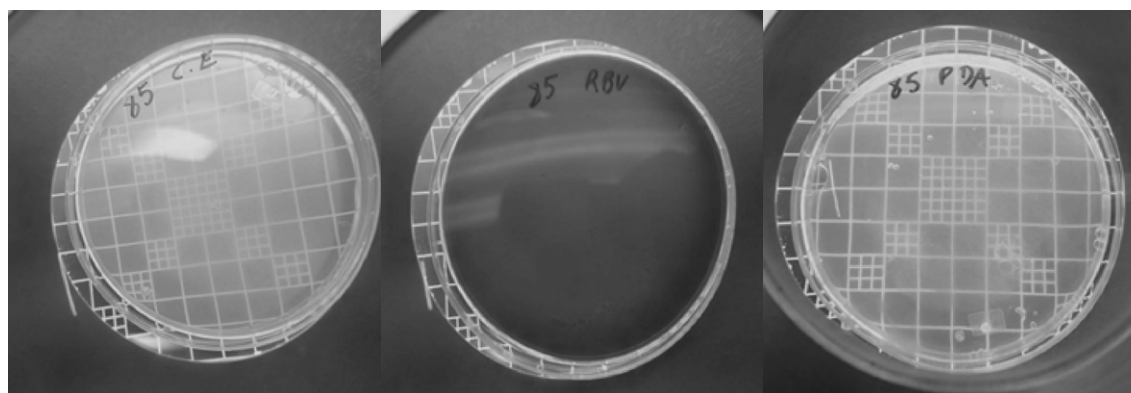
|                      | Ea (KJmol <sup>-1</sup> ) | A (min <sup>-1</sup> ) | Nabla (x10 <sup>4</sup> ) |
|----------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| <i>Salmonella sp</i> | 320.76                    | 1.19x10 <sup>50</sup>  | 1.37                      |
| <i>Listeria sp</i>   | 345.09                    | 1.11x10 <sup>54</sup>  | 3.53                      |

Figura 2. Regresión lineal para obtener los valores de  $E_a$  y  $A$  para *Salmonella sp* y *Listeria sp* en medio líquido



Para evaluar la eficiencia del tratamiento, se calculan las constantes de letalidad térmica  $kd^*$  de los microorganismos a partir de los valores de  $E_a$  y  $A$  utilizando la ecuación (1) aplicados al tiempo y las temperaturas a las que fue sometido el tratamiento térmico en la bebida formulada (de 10°C a 85°C manteniendo la temperatura por 90 segundos y dejando enfriar hasta 16°C). Finalmente graficando el tiempo vs  $kd^*$  y calculando el área bajo la curva se obtiene el valor del Factor Nabla para cada microorganismo mostrados en la TABLA 3. En la industria farmacéutica, el criterio de esterilidad (valor del factor Nabla) en algunas operaciones es de 23.2, o sea la probabilidad de que sobreviva una espora de *Bacillus stearothermophilus* partiendo de  $1.2 \times 10^{10}$  esporas a 121 °C durante 9 minutos (Hoskins, 1979; Kirk & Hambleton, 1981), mientras que el criterio de diseño que proponen los autores originales del parámetro (Deindoerfer & Humphrey, 1959) es de 40.0 para el mismo microorganismo partiendo de  $2 \times 10^{10}$  esporas a la misma temperatura. Los valores de Nabla obtenidos en este trabajo para los microorganismos de interés *Salmonella sp* y *Listeria sp* a 85 °C durante 90 segundos, se encuentran muy por encima de los reportados por aquellos autores por lo que se concluye que el tratamiento fue eficiente e incluso, probablemente, sobrado para eliminar a los microorganismos de interés. Para tener evidencias de lo anterior, se realizó un cultivo de la bebida después del tratamiento térmico donde se puede observar que efectivamente no hubo crecimiento alguno (FIGURA 3).

Figura 3. Análisis microbiológico en busca de bacterias mesófilas aerobias, coliformes totales y mohos y levaduras con tratamiento térmico a 85 °C durante 90 segundos en la bebida diseñada (dilución  $10^0$ ).





### 2.1.2 Caracterización fisicoquímica

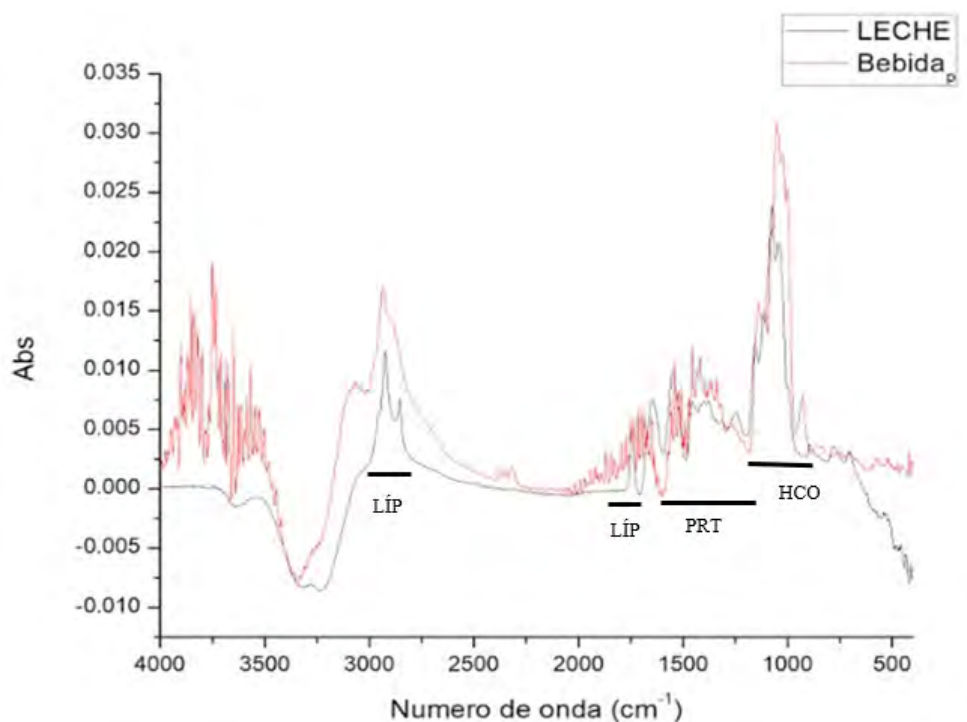
Las determinaciones fisicoquímicas realizadas a la bebida formulada fueron: determinación de

cenizas, determinación de pH, cuantificación de proteínas y caracterización espectroscópica por FTIR. La determinación de cenizas alcanzó un valor de 0.81 %, mientras que el pH de la bebida fue de 7.4. La cantidad proteica de la formulación fue de  $4.02 \pm 0.03$  g/100 mL, valor superior al reportado por Rendón *et al.* (2011) quienes obtuvieron 0.81 g/100 mL. Respecto a la formulación propuesta por Contreras *et al.* (2011), ellos obtuvieron 10.07 g/100 mL de proteína, ésta última es superior a nuestra propuesta debido al enriquecimiento con soya que, como ya está muy reportado, incrementa considerablemente el aporte proteico. Por otro lado, se sabe que la espectroscopia de infrarrojo medio (MIR) es una técnica bien establecida para la identificación y análisis estructural de compuestos químicos. Los picos en el espectro IR de una muestra representan la excitación de los modos vibratorios de las moléculas en la muestra y, por lo tanto, están asociados con los diversos enlaces químicos y grupos funcionales presentes en las moléculas. Por tanto, el espectro de infrarrojos de un compuesto es una de sus propiedades físicas más características y puede considerarse como su “huella digital”. La espectroscopia infrarroja también es una herramienta poderosa para el análisis cuantitativo, ya que la cantidad de energía infrarroja absorbida por un compuesto es proporcional a su concentración (Paré & Bélanger, 1997). La aplicación de la espectroscopia IR a la determinación cuantitativa de grasas, proteínas y lactosa en leche es un método oficial reconocido por la AOAC (Kavanagh, 1981). Los analizadores de leche IR comerciales son utilizados ampliamente como base para realizar análisis de recepción en la industria láctea y establecer el pago de la leche, el registro del ganado lechero y el control de calidad de rutina (Voort *et al.*, 1987). La cuantificación de cada componente se basa en mediciones en dos longitudes de onda específicas, correspondientes a una longitud de onda a la que absorbe el componente (longitud de onda de la muestra) y una longitud de onda de referencia en la que no se produce una absorción significativa. Las versiones automatizadas de estos instrumentos son capaces de analizar una muestra de leche cada 20 segundos (Biggs, 1979). Los analizadores de leche IR se calibran con un conjunto de leches de calibración que se han analizado mediante métodos de referencia adecuados, por ejemplo, el método de Mojonier para el contenido de grasa, el análisis Kjeldahl para el contenido de proteínas y la polarimetría para el contenido de lactosa. Las especificaciones de la AOAC sobre reproducibilidad y precisión (en relación con los métodos de referencia) son estrictas pero los analizadores de leche IR comerciales las cumplen habitualmente (Kavanagh, 1981). El espectro de leche ha sido publicado por varios autores (Iñon, *et al.*, 2004; Markoska, Huppertz *et al.*, 2019). El espectro de la bebida formulada (FIGURA 4) junto al de la leche entera muestra que los perfiles son muy similares en cuanto a las bandas e intensidades (absorbancia).

En la región espectral de  $3\ 100$  a  $2\ 800\text{ cm}^{-1}$  la absorbancia es mayor en la bebida comparada con la leche sobre el contenido de lípidos. De acuerdo con Jahaniaval *et al.*, (2000) el contenido de lípidos que contiene el amaranto es del 7 %, en donde el 36.3 % son ácidos grasos oleico, 35.9 % ácido graso linoleico y un 3.4 % ácido graso linolénico. Por otro lado, en la región espectral  $1800\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a proteínas, se muestra una gran similitud en la absorbancia, lo que pudiese inferir que estas variaciones puede ser por los diferentes tipos de aminoácidos que se encuentran presentes en la leche dado que es un producto de origen animal, mientras que la bebida está formulada a partir de un pseudocereal y una fruta haciendo de ésta una bebida de origen vegetal. Se sabe que la leche entera contiene aproximadamente 3.5 g/100 mL de proteína (Voort *et al.*, 1987). El análisis fisicoquímico que se realizó a la bebida se encontró que presenta 4.02 g/100 mL, justificando que la región espectral de proteínas sea muy similar entre ellas. La región espectral  $1200\text{-}900\text{ cm}^{-1}$  sugiere la presencia de azúcares presentes en la bebida, puede observarse que, la intensidad en la absorbancia es mayor comparada con la leche de vaca. Esto puede deberse a la adición de sacarosa durante la

formulación de la bebida (ajustada a 13° Brix) que claramente se vio reflejado, mientras que el tipo de azúcar que posee la leche es lactosa, lo cual puede considerarse una ventaja del producto diseñado, por la cantidad de personas que presentan intolerancia a dicho carbohidrato.

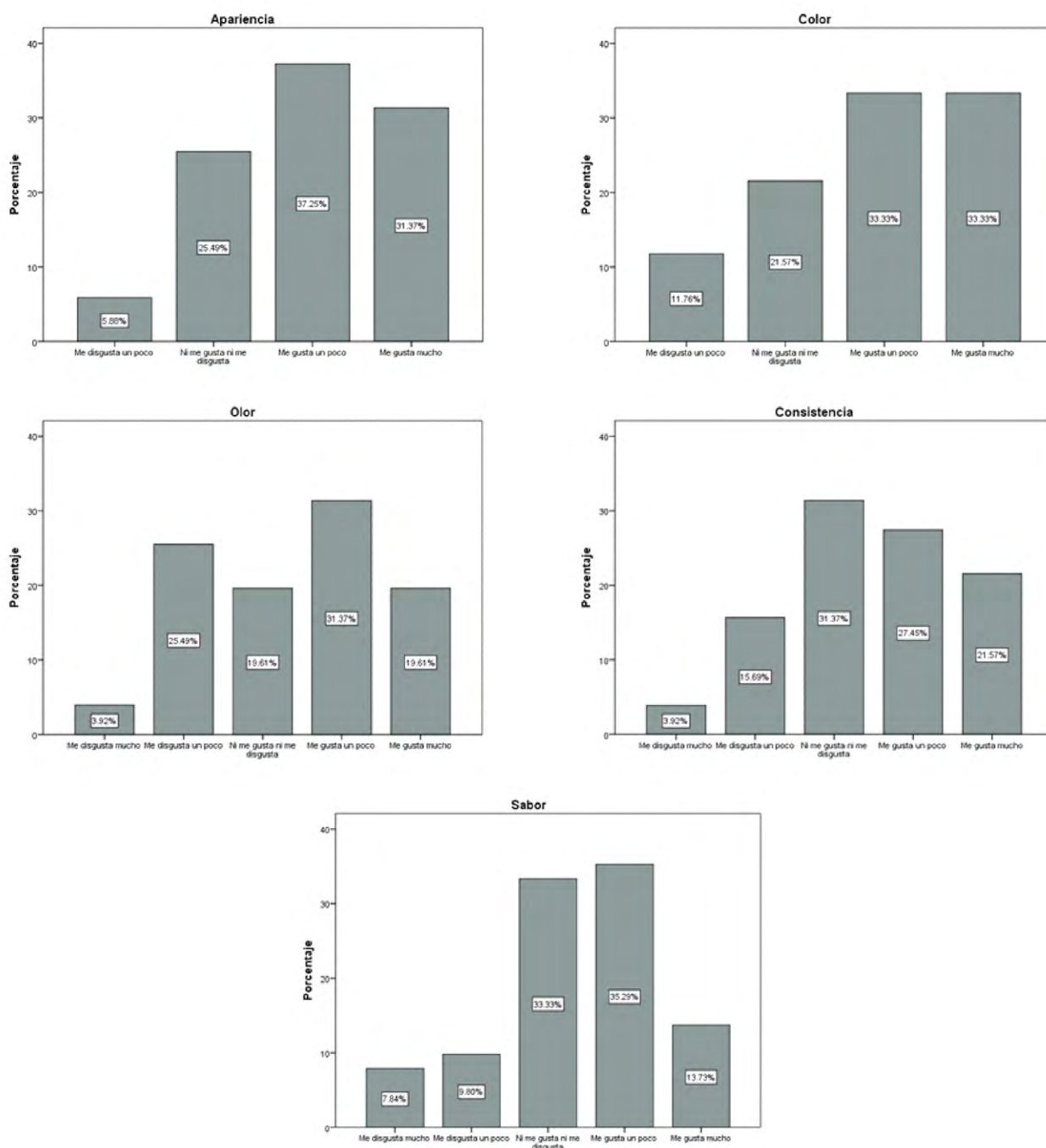
Figura 4. Espectro FTIR-ATR de leche entera comparado con el espectro de la bebida diseñada en este trabajo



## 2.2 Análisis sensorial

Se elaboró un formato para aplicar las pruebas sensoriales mediante el uso de la escala hedónica de 5 puntos. En donde se buscó encontrar en panelistas no entrenados la aceptación de la bebida, además de que se aplicó también la comparación versus una bebida comercial. La escala partió con el siguiente puntaje: 5 puntos (Me gusta mucho), 4 puntos (Me gusta poco), 3 puntos (Ni me gusta ni me disgusta), 2 puntos (Me disgusta un poco) y 1 punto (Me disgusta mucho). Para la prueba de aceptación se elaboró un formato en Google Forms® que se respondió en tiempo real. Mientras que para la encuesta de comparación se entregó un formato escrito propuesto por Stone *et al.* (2012) modificado. El primer atributo evaluado fue “Apariencia”, se encontró que el 37.25 % respondió “me gusta un poco”, seguido de un 31.37 % a “me gusta mucho”, un 25.49 % “ni me gusta ni me disgusta”, y un 5.88 % “me disgusta un poco” (FIGURA 5). Esta evaluación sugiere que la bebida tuvo una buena aprobación respecto a la apariencia. Este atributo, según Moskowitz *et al.* (2012) mencionan que la apariencia en un producto comúnmente determina si un producto es rechazado o aceptado.

Figura 5. Resultados del análisis de aceptación con escala hedónica de 5 puntos para la bebida diseñada.



El segundo atributo evaluado fue “Color”. Se encontró que el 33.33 % respondió: “me gusta mucho” y el mismo resultado para: “me gusta poco”. Un 21.57 % fue: “ni me gusta, ni me disgusta” y el 11.76 % “me disgusta un poco”. Se puede observar que aproximadamente el 66 % de la población encuestada tiene una inclinación favorable hacia el color de la bebida.

Watts *et al.* (1992) hacen hincapié en que el color provoca una expectativa psicológica que conlleva a inferir el sabor de los alimentos y que comúnmente es imposible modificar esta idea. En

cuanto al atributo “Olor”, el 31.37 % evaluó como: “me gusta un poco”, un 25.49 % “me disgusta un poco”, un 19.61 % “ni me gusta ni me disgusta” y “me gusta mucho”, y el 3.92 % “me disgusta mucho”. En esta sección se puede observar que poco más del cincuenta por ciento de los panelistas se encontraban entre “Me gusta un poco” y “Me disgusta un poco”. Como se sabe, la percepción del olor hace referencia a la noción de un estímulo de sustancias volátiles que se encuentran en los alimentos (Stone *et al.*, 2012). Moskowitz *et al.* (2012) mencionan que los productos vegetales son más abundantes en compuestos aromáticos pero en cereales la cantidad es menor. La bebida está compuesta en mayor cantidad entre un pseudocereal y una fruta que posee un aroma característico, pero puede ser que por la mezcla el aroma disminuyó y probablemente fue más difícil distinguir esta característica. La cuarta pregunta del formulario cuestionó sobre el atributo “Consistencia” y se encontró que el 31.37 % calificó con un “ni me gusta ni me disgusta”, un 27.45 % con “me gusta un poco”, un 21.57 % con “me gusta mucho”, un 15.69 % con “me disgusta un poco”, y un 3.92 % con “me disgusta mucho”.

Este proyecto buscó que la bebida tuviera una mezcla coloidal que no permitiera una separación evidente y desagradable ante los panelistas. Se observó que se percibió entre “ni me gusta ni me disgusta” y “me gusta poco”. Estos datos son importantes para poder implementar mejoras en la suspensión ya que, si bien no se presentaron separaciones de fases, este atributo fue percibido de una manera no óptima. El quinto atributo evaluado fue el “Sabor”. Se encontró que el 35.29 % respondió con un “me gusta un poco”, el 33.33 % con un “ni me gusta ni me disgusta”, el 13.73 % con un “me gusta mucho”, el 9.80 % con un “me disgusta un poco”, y el 7.84 % con un “me disgusta mucho”. Moskowitz *et al.* (2012) mencionan la importancia de este atributo en el desarrollo de alimentos, alrededor del 80 % de las personas vuelven a consumir un alimento cuyo sabor fue de su agrado y la misma proporción deja de hacerlo cuando el atributo no fue de su agrado. Para obtener información sobre nuestro desarrollo comparado con una bebida comercial se realizaron pruebas de comparación contra una bebida comercial de la marca Ades® (Bebida Control, BC). En el atributo “Color”, el 42 % contestó “me gusta mucho”, el 30 % con un “me gusta poco”, el 16 % con un “ni me gusta ni me disgusta”, el 8 % con un “me disgusta un poco”, y el 4 % con un “me disgusta mucho” para la bebida diseñada. En cuanto al control, se encontró que el 45 % se identificó con “Me gusta mucho”, el 29 % con un “me gusta poco”, un 22 % con un “ni me gusta ni me disgusta” y un 4 % con un “me disgusta un poco”. Mediante una prueba *t* de Student con el 95 % de confianza se encontró que no existía diferencia significativa entre nuestra bebida (Prototipo) y la muestra control ( $p > 0.05$ ). Los estadísticos descriptivos y los resultados de significancia se muestran en las TABLAS 4 y 5 respectivamente.

En torno al atributo “Olor”, para la bebida 38 % se identificó con “ni me gusta ni me disgusta”, un 29 % con “me disgusta un poco”, un 19 % con “me gusta poco”, y un 7 % con “me disgusta mucho” así como “me gusta mucho” respectivamente. En cuanto al control los panelistas refirieron que el 48 % fue un “me gusta mucho”, el 28 % con un “me gusta poco”, el 19 % con un “ni me gusta ni me disgusta”, un 4 % con un “me disgusta un poco” y un 1 % con un “me disgusta mucho”. Para este parámetro si hubo diferencia significativa entre las bebidas estudiadas ( $p < 0.01$ ) como se muestra en la TABLA 4. El tercer atributo evaluado fue la “Consistencia”, para nuestro diseño, el 29.00 % de los panelistas se identificó con un “me gusta poco”, el 24 % con un “ni me gusta ni me disgusta”, el 23 % con un “me disgusta un poco”, el 16 % con un “me gusta mucho” y con un 8 % fue un “me disgusta mucho”. El control mostró que el 58 % se identificó con un “me gusta mucho”, el 28 % con un “me gusta poco”, un 12 % con un “ni me gusta ni me disgusta” y un 2 % con un “me disgusta un poco”. Aquí también se presentó una diferencia significativa ( $p < 0.01$ ) entre las muestras (TABLA 5).

Figura 6. Resultados del análisis de comparación con escala hedónica de 5 puntos para la bebida diseñada.

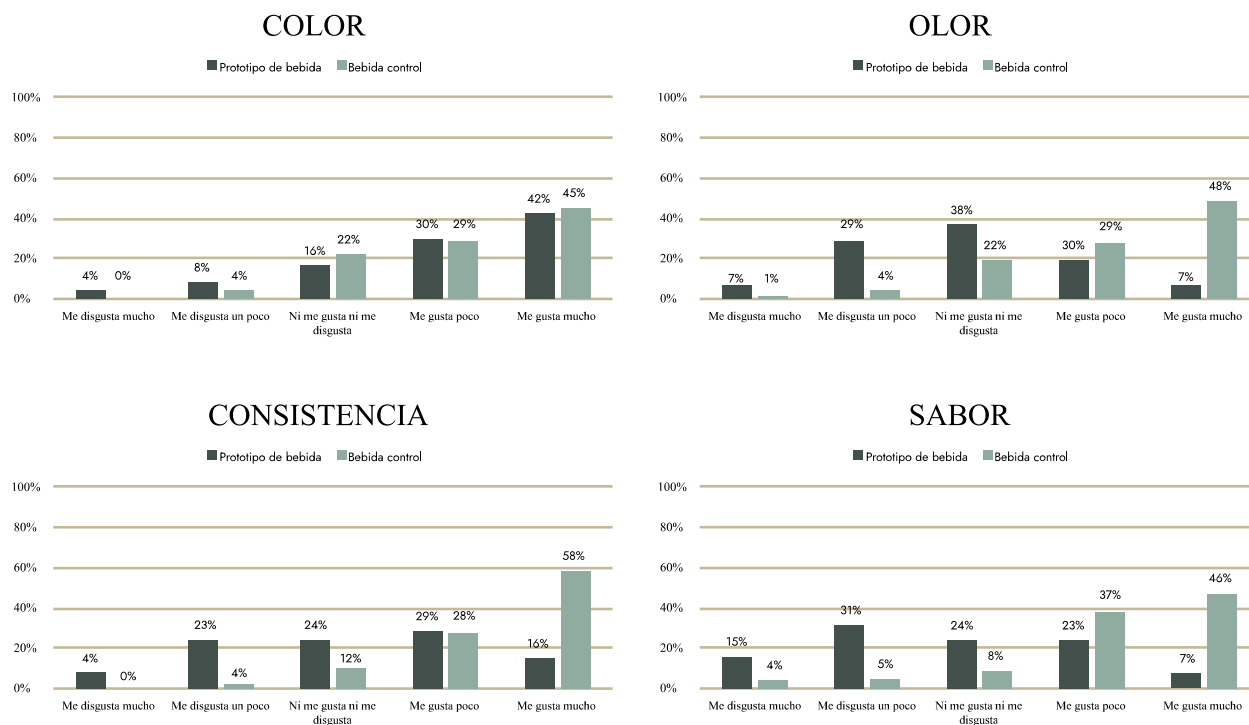


Tabla 4. Estadísticos descriptivos de comparación entre la bebida desarrollada (Prototipo) y la bebida control (Ades®)

|              | Bebida    | N   | Media | Desviación estándar | Media de error estándar |
|--------------|-----------|-----|-------|---------------------|-------------------------|
| Olor         | Prototipo | 100 | 2.90  | 1.020               | .102                    |
|              | Control   | 100 | 4.18  | .947                | .095                    |
| Sabor        | Prototipo | 100 | 2.76  | 1.173               | .117                    |
|              | Control   | 100 | 4.16  | 1.042               | .104                    |
| Color        | Prototipo | 100 | 3.98  | 1.128               | .113                    |
|              | Control   | 100 | 4.15  | .903                | .090                    |
| Consistencia | Prototipo | 100 | 3.22  | 1.203               | .120                    |
|              | Control   | 100 | 4.42  | .781                | .078                    |

Tabla 5. Prueba t de Student al 95 % de confianza para muestras independientes entre la bebida diseñada y la muestra control

|              | °                   | t      | Gl      | p-valor | Diferencia de medias | Diferencia de error estándar |
|--------------|---------------------|--------|---------|---------|----------------------|------------------------------|
| Olor         | Varianzas iguales   | -9.197 | 198     | .000    | -1.280               | .139                         |
|              | Varianzas distintas | -9.197 | 196.914 | .000    | -1.280               | .139                         |
| Sabor        | Varianzas iguales   | -8.924 | 198     | .000    | -1.400               | .157                         |
|              | Varianzas distintas | -8.924 | 195.272 | .000    | -1.400               | .157                         |
| Color        | Varianzas iguales   | -1.176 | 198     | .241    | -.170                | .144                         |
|              | Varianzas distintas | -1.176 | 188.961 | .241    | -.170                | .144                         |
| Consistencia | Varianzas iguales   | -8.369 | 198     | .000    | -1.200               | .143                         |
|              | Varianzas distintas | -8.369 | 169.881 | .000    | -1.200               | .143                         |

Finalmente, el último parámetro evaluado fue el sabor. En cuanto al prototipo de bebida, el 31 % se identificó con “Me disgusta un poco”, el 24 % con un “ni me gusta ni me disgusta”, el 23 % con un “me gusta poco”, el 15 % con un “me disgusta mucho”, y un 7 % con un “me gusta mucho”. Mientras que, para el control, se encontró que el 46 % se identificó con un “me gusta mucho”, el 37 % con un “me gusta poco”, el 8 % con un “ni me gusta ni me disgusta”, el 5.00 % con un “me disgusta un poco” y un 4 % con un “me disgusta mucho”. La BC mostró mayor preferencia por los panelistas respecto al sabor, mientras que el PB su calificación fue baja comparado con la evaluación en donde únicamente los panelistas evaluaban a ésta última. Nuevamente hubo una marcada diferencia significativa entre las muestras ( $p < 0.01$ ).

### 3. Conclusiones

La elaboración de la bebida a base de amaranto y pitaya roja busca ser una opción de bebida vegetal que pueda ser incluida en la alimentación diaria de la población. Si bien está en etapas básicas de desarrollo, pretende ser considerada como un complemento nutricional, se logró una estabilización de la suspensión con un tamaño de partícula  $< 75$  micrómetros, lo que permitió una adecuada incorporación entre el amaranto y la pitaya roja. El tratamiento térmico aplicado a la bebida demostró ser adecuado, puesto que no se presentó crecimiento microbiano alguno. Además, se propuso un método alterno para evaluar el tratamiento térmico con base a la cinética de muerte térmica de los microorganismos de interés que ya es ampliamente utilizado en otros sectores industriales, donde se manejan líquidos que requieren una esterilidad estricta y que puede ser aplicado a la industria de los alimentos. El aporte de 4.02 g/100 mL de proteína del producto diseñado, lo hace una buena opción para asegurar un aporte diario de este macronutriente formando parte de un complemento de las ingestas diarias recomendadas en la población. La similitud que presentaron los perfiles espectrales FTIR entre la leche entera y el producto diseñado proporciona una idea general de que la



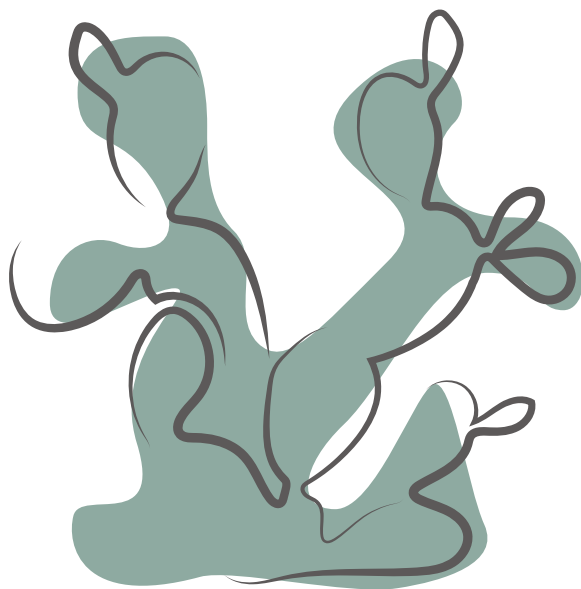
composición de esta bebida vegetal puede ser utilizada como alternativa en pacientes que presenten intolerancia a la lactosa, inflamación intestinal por las bebidas a base de soya, bebidas con alto contenido en grasa, vegetarianos, personas con bajos recursos económicos, por mencionar algunas aplicaciones prácticas. Finalmente, las pruebas sensoriales permitieron observar que la bebida cuenta con una buena aceptación con respecto a la apariencia, el color y el sabor. Sin embargo, comparando la bebida diseñada con productos líderes en el mercado, hay oportunidades de mejora para poder competir con estos productos.

## 5. Referencias

- Alfaro, M. A., Martínez, A., Ramírez, R., & Bressani, R. (1987). Rendimiento y composición química de las partes vegetativas del amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*, L.) en diferentes etapas fisiológicas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 108–21.
- Amicarelli, V., & Camaggio, G. (2012). *Amaranthus: a crop to rediscover*. *Forum Ware International* (Vol. 2, pp. 4–11). International Society of Commodity Science and Technology (IGWT) Vienna.
- Angel Huerta-Ocampo, J., & Rosa, A. Paulina Barba de la. (2011). Amaranth: a pseudo-cereal with nutraceutical properties. *Current Nutrition & Food Science*, 7(1), 1–9.
- Arias-Rico, J., Macías-León, F. J., Alanís-García, E., Cruz-Cansino, N. del S., Jaramillo-Morales, O. A., Barrera-Gálvez, R., & Ramírez-Moreno, E. (2020). Study of Edible Plants: Effects of Boiling on Nutritional, Antioxidant, and Physicochemical Properties. *Foods*, 9(5), 599.
- Balderas, V., Palafox, L., Castro, A. S., & Saucedo, C. (2016). Evaluación de las propiedades físicas y calidad organoléptica y nutricional de frutos de pitaya (*Stenocereus pruinosus*). *Revista Iberoamericana de Ciencias* 3(7), 86–92.
- Béhar, M. (1977). La desnutrición como una enfermedad social. La comunidad y el desarrollo de los servicios primarios de salud—Héctor R. Acuña, 11(2), 172.
- Biggs, D. A. (1979). Infrared estimation of fat, protein, and lactose in milk: evaluation of Multispec instrument. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 62(6), 1202–1210.
- Bressani, R., Gonzales, J., Zuniga, J., Breuner, M., & Elias, L. (1987). Yield, selected chemical composition and nutritive value of 14 selections of amaranth grain representing four species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 38(4), 347–356.
- Carrillo Terán, W. I., Vilcacundo, R., & Carpio, C. (2015). Compuestos bioactivos derivados de amaranto y quinua. *Actualización en Nutrición*, 18–22.
- Contreras, E., Jaimez, J., Soto, J. C., Castañeda, A., & Añorve, J. (2011). Aumento del contenido proteico de una bebida a base de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*). *Revista chilena de nutrición*, 38(3), 322–330.
- Deindoerfer, F., & Humphrey, A. (1959). Analytical method for calculating heat sterilization times. *Applied Microbiology*, 7(4), 256.
- Ertola Rodolfo, Y. O. y M. C. (2006). *Microbiología Industrial*. (C. y T. Departamento de Cultura Educación, Ed.). Organización de los Estados Americanos.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Carmen Luna-Morales, C. del. (2016). Postharvest quality, soluble phenols, betalains content, and antioxidant activity of *Stenocereus pruinosus* and *Stenocereus stellatus* fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 69–76.
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Joaquín-Cruz, E. (2013). Physical, chemical, and antioxidant activity characterization of pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 68(4), 403–410.
- Georgé, S., Brat, P., Alter, P., & Amiot, M. J. (2005). Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products. *Journal of Agricultural and food chemistry*, 53(5), 1370–1373.
- Gómez, R. G. C. (2019). Desigualdad en el acceso a alimentos de mujeres y niños zoques de México. *RECIIS (Online)*, 768–783.
- González, P. R., & Haro, A. L. (2013). Desnutrición y obesidad en pediatría. Editorial Alfíl, SA de CV.
- Grant, D. L. (2019). Food irradiation, heat treatment, and related processing techniques: safety evaluation. *International food safety handbook* 287–316.

- Hoskins, H. T. (1979). Aspects of autoclave monitoring and process control. *Journal of Clinical Pharmacy and Therapeutics*, 4(1), 9–18.
- Imeri, A., González, J. M., Flores, R., Elías, L. G. Bressani, R. (1987). Variabilidad genética, y correlaciones entre rendimiento, tamaño del grano, composición química y calidad de la proteína de 25 variedades de amaranto (*Amaranthus caudatus*). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 132–46.
- Iñon, F. A., Garrigues, S., & Guardia, M. de la. (2004). Nutritional parameters of commercially available milk samples by FTIR and chemometric techniques. *Analytica Chimica Acta*, 513(2), 401–412.
- Irudayaraj, J. M. (2001). Food processing operations modeling: design and analysis. CRC press.
- Jahaniaval, F., Kakuda, Y., & Marcone, M. (2000). Fatty acid and triacylglycerol compositions of seed oils of five *Amaranthus* accessions and their comparison to other oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(8), 847.
- Kavanagh, F. (1981). Official methods of analysis of the AOAC, Edited by WILLIAM HORWITZ. The Association of Official Analytical Chemists, 1111 N. 19th St., Arlington, VA 22209. 1980. 1038 pp., 70(4), 468.
- Kirk, B., & Hambleton, R. (1981). Evaluation of a prototype micro-electronic autoclave cycle integrator. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 33(1), 69–74.
- Koribilli, N., Aravamudan, K., & Varadhan, M. A. (2011). Quantifying enhancement in heat transfer due to natural convection during canned food thermal sterilization in a still retort. *Food and bioprocess technology*, 4(3), 429–450.
- Lawless, H. T. (2012). Laboratory exercises for sensory evaluation. Springer Science & Business Media.
- Lonnie, M., Hooker, E., Brunstrom, J. M., Corfe, B. M., Green, M. A., Watson, A. W., Williams, E. A., et al. (2018). Protein for life: Review of optimal protein intake, sustainable dietary sources and the effect on appetite in ageing adults. *Nutrients*, 10(3), 360.
- Luis, G. M., Hernández, B. R. H., Caballero, V. P., López, N. G. T., Espinoza, V., & Pacheco, L. R. (2018). Usos actuales y potenciales del Amaranto (*Amaranthus* spp.). *Journal of Negative and No Positive Results: JONNPR*, 3(6), 423–436.
- Mapes, E., Espitia, E., Inifap, R., & Baj, C. (2010). Recopilación y análisis de la información existente de las especies del genero *amaranthus* cultivadas y de sus posibles parientes silvestres en México. Project: Centro de origen y diversidad genética, México. México: DGSPNR-SEMARNAT/CONABIO.
- Markoska, T., Huppertz, T., Grewal, M. K., & Vasiljevic, T. (2019). FTIR analysis of physiochemical changes in raw skim milk upon concentration. *LWT Food Science and Technology*, 102, 64–70.
- Martínez-González, J. C. (2010). Principales Cultivares de Pitaya en Puebla y Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Moskowitz, H. R., Beckley, J. H., & Resurreccion, A. V. (2012). Sensory and consumer research in food product design and development. John Wiley & Sons.
- Murphy, R., Marks, B., Johnson, E., & Johnson, M. (2000). Thermal inactivation kinetics of *Salmonella* and *Listeria* in ground chicken breast meat and liquid medium. *Journal of Food Science*, 65(4), 706–710.
- Nimbalkar, M. S., Pai, S. R., Pawar, N. V., Oulkar, D., & Dixit, G. B. (2012). Free amino acid profiling in grain *Amaranth* using LC–MS/MS. *Food Chemistry*, 134(4), 2565–2569.
- Ortega, M. H. S., Siqueiros-Delgado, M. E., Sosa-Ramírez, J., & Cerros-Tlatilpa, R. (2017). *Amaranthaceae* (Caryophyllales) richness and distribution in the state of Aguascalientes, México. *Botanical Sciences*, 95(2), 203–220.
- Paraje, G. (2008). Evolución de la desnutrición crónica infantil y su distribución socioeconómica en siete países de América Latina y el Caribe. CEPAL.
- Paré, J., & Bélanger, J. M. (1997). Instrumental methods in food analysis. Elsevier.
- Parra, F., Pérez-Nasser, N., Lira, R., Pérez-Salicrup, D., & Casas, A. (2008). Population genetics and process of domestication of *Stenocereus pruinosus* (Cactaceae) in the Tehuacán Valley, México. *Journal of Arid Environments*, 72(11), 1997–2010.
- Pérez-Loredo, M. G., García-Ochoa, F., & Barragán-Huerta, B. E. (2016). Comparative analysis of betalain content in *Stenocereus stellatus* fruits and other cactus fruits using principal component analysis. *International Journal of Food Properties*, 19(2), 326–338.
- Quiroz-González, B., García-Mateos, M., Corrales-García, J., & Colinas-León, M. (2018). Pitaya (*Stenocereus* spp.): An under-utilized fruit. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 20, 82–100.

- Ramírez Mayans, J. A., & others. (2019). Nutrición infantil en México ¿Hacia dónde vamos? *Acta Pediátrica de México* 23(1):28-30
- Ramírez Vazquez, M., Espitia Rangel, E., Carballo Carballo, A., Zepeda Bautista, R., Vaquera Huerta, H., Córdova Téllez, L., & others. (2011). Fertilización y densidad de plantas en variedades de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(6), 855–866.
- Rendon, F. J. L. (2011). *Elaboracion de una bebida con base en amaranto de diferentes sabores, su aporte nutricional y evaluacion sensorial. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Nutrición. Universidad de las Américas-Puebla, México.*
- Rojas Pérez, Perla Cristina; Gijón Cruz, Alicia Sylvia y Luis García, Yesenia Jiceel (2015): *Producción de pitaya como alternativa de desarrollo local en Acaquizapán, Santiago Chazumba, Oaxaca. En: Pasado, presente y futuro de las regiones en México y su estudio. Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional, A. C., México. ISBN AMECIDER: 978-607-96649-1-6 UNAM-IIEc: 978-607-02-7436-7*
- Rosales-Bustamante, E., Luna-Morales, C. del C., & Cruz-León, A. (2009). Clasificación y selección tradicional de pitaya (*Stenocereus pruinosus* (Otto) Buxb.) en Tlanguistengo, Oaxaca y variación morfológica de cultivares. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 15(1), 75–82.
- Sánchez, E. C. M. (2010). *AMARANTO. Política de Estado para la Educación Superior. AAPAUNAM Academia, Ciencia y Cultura.*
- Sánchez-Olarte, J., Argumedo-Macías, A., Álvarez-Gaxiola, J. F., Méndez-Espinoza, J. A., & Ortiz-Espejel, B. (2015). Conocimiento tradicional en prácticas agrícolas en el sistema del cultivo de amaranto en Tochimilco, Puebla. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 12(2), 237–254.
- Shamah-Levy, T., Campos-Nonato, I., Cuevas-Nasu, L., Hernández-Barrera, L., Morales-Ruán, M. del C., Rivera-Dommarco, J., & Barquera, S. (2020). Sobre peso y obesidad en población mexicana en condición de vulnerabilidad. *Resultados de la Ensanut 100k. Salud pública de México*, 61(6), 852–865.
- Stone, H., Bleibaum, R. N., & Thomas, H. A. (2012). *Sensory evaluation practices. Academic press.*
- Vásquez-Garibay, E., Navarro, L., Romero, V., & Vizmanos, L. (1999). Hábitos de alimentación en niños con desnutrición proteico-calórica primaria y secundaria grave. *Boletín Médico del Hospital Infantil de México*, 56(10), 543–549.
- Venskutonis, P. R., & Kraujalis, P. (2013). Nutritional components of amaranth seeds and vegetables: a review on composition, properties, and uses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(4), 381–412.
- Voort, F. van de, Kermasha, S., Mills, B., & Ng-Kwai-Hang, K. (1987). Factors affecting differences in milk test fat results obtained by the Babcock, Rose-Gottlieb and infrared milk analysis. *Journal of Dairy Science* 71, 290–298.
- Watts, B., Ylimaki, G., Jeffery, L., & Elias, L. (1992). *Metodos basicos sensoriales para la evaluacion de alimentos (pp. 74–75). Intemational Development Research Centre.*



## Elaboración de harina de pescado a partir de residuos de actividades pesqueras de Puerto Peñasco, Sonora en México

Rivera Nuñez, Ixtoc Marlo<sup>1</sup>  
Pérez Armendáriz, Beatriz<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> Área de ciencias, ingeniería y derecho,  
Universidad Loyola del Pacífico, Acapulco, México.

<sup>(2)</sup> Decanato de Ciencias Biológicas, Universidad  
Popular Autónoma del Estado de Puebla. Puebla  
México.

\* Correspondencia  
<https://orcid.org/0000-0002-0665-7455>,  
[ixtoc.rivera@loyola.edu.mx](mailto:ixtoc.rivera@loyola.edu.mx).

Los residuos orgánicos procedentes de actividades intensivas pesqueras, son un problema de contaminación ambiental, con asociaciones a enfermedades gástricas y de un impacto negativo al ambiente. En el municipio de Puerto Peñasco, la principal actividad económica es la pesca, en modalidad ribereña y de altura, los residuos de esta actividad son poco o nada aprovechados. El objetivo de esta investigación fue realizar una investigación no experimental, empleando entrevistas no estructuradas a personajes clave para conocer la problemática en la región, y en una segunda fase, se propuso una tecnología para el aprovechamiento de estos recursos. Los resultados mostraron que los desechos oscilan entre un 40 % y 60 %, en función de las especies y de la técnica y experiencia del fileteador; agosto y marzo son los meses con mayor actividad y las especies que más pescan son: lenguado, manta, cochito, guitarra, angelito y tiburón. Se aprovecharon residuos de la región y se obtuvo una harina de pescado con 56.86 % de proteína, 28.43 % de cenizas y 2.62 % de humedad. La propuesta tecnológica de esta investigación genera un producto de valor agregado y permite generar conciencia para el aprovechamiento de los residuos, en una propuesta para tener una economía circular en esta actividad.

**Palabras clave:** actividad pesquera, harina de pescado, Puerto Peñasco, residuos de pescado, residuos orgánicos.



## Introducción

En México, la problemática que ocasiona la mala gestión de los residuos, al igual que en gran parte de los países de América Latina, se ve magnificada por la falta de conciencia ambiental de sus habitantes y el desinterés de sus gobernantes (Sáes y Urdaneta, 2014). Como parte de la política pública mexicana en materia ambiental, en el año 2003 se creó la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), que divide a los residuos generados en la nación en 3 tipos: i) Residuos Sólidos Urbanos; ii) Residuos de Manejo Especial (RME); y iii) Residuos Peligrosos. Cada uno de ellos con características y jurisdicciones establecidas en la normativa.

Esta investigación centra su atención en los segundos mencionados, Residuos de Manejo Especial, y más específicamente en un tipo de ellos. Descritos en el artículo 4, sección XXX de la LGPGIR (2003), que se enuncia “Residuos de Manejo Especial: Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos” (p 6).

Para el caso de los residuos procedentes de la pesca, la fracción III del artículo 19 de la LGPGIR se refiere a aquellos generados por las actividades pesqueras como residuos de manejo especial. Del mismo modo, se refuerza su categorización en la sección 3 del Listado de residuos de manejo especial sujetos a presentar plan de manejo, en la NOM-161-SEMARNAT-2011, donde se hace referencia de la obligación de presentar un plan de manejo a los residuos orgánicos procedentes de actividades intensivas pesqueras.

### La generación de residuos pesqueros en México

Conforme a la clasificación oficial de la LGPGIR, los residuos pesqueros en México son clasificados como de manejo especial y corresponden a jurisdicción estatal. De acuerdo al Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (INECC, 2012) el promedio de residuos pesqueros generados en el periodo 2006-2012 es de 799.02 mil toneladas por año. El manejo que se presenta es mínimo, en la mayoría de los casos son desechados en borda o depositados en tiraderos a cielo abierto, usualmente de manera clandestina. En el periodo 2006-2010 del total de residuos de la industria atunera se reutilizó el 3.67 % para la producción de harina y aceite de pescado.

Por su parte, el Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2013 (CONAPESCA, 2013), en el apartado de industrialización hace mención de desperdicios, pero no explica en qué consiste ni qué valores se tomaron en cuenta. En el año 2013 se estimó un total de 65,781 toneladas, lo que representa una disminución considerando que se tenía un promedio de 82,791 toneladas, en los 9 años anteriores.

El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), reportó un total de cerca de 2 millones de toneladas de producción pesquera y acuícola en el año 2018. De nuevo en un escenario



conservador, donde la mitad de la producción pesquera es convertida en residuo, tanto los datos reportados en el Anuario, como los del Diagnóstico quedan muy lejanos de la realidad.

Es evidente que hace falta información unificada e integradora sobre la generación de los residuos pesqueros, así también, es necesario realizar estudios sobre los impactos negativos que se provocan al medio ambiente y a la salud en cada sitio de generación. No se descarta la inclusión de nueva normativa que regule el control de los mismos, como el Decreto supremo *N. 006-2014-PRODUCE* de la República de Perú (2014) donde se obliga a que los residuos del procesamiento de la industria pesquera sean llevados a una planta tratadora para convertirlos en productos comerciales.

La presente investigación centra su atención en identificar las fuentes productoras y tipos de residuos orgánicos pesqueros que se generan en el municipio de Puerto Peñasco, Sonora en México. Además, propone una tecnología para su aprovechamiento, a través de la producción de harina de pescado y determina su calidad bromatológica. Es importante enfatizar que, a diferencia de lo que ocurre en las plantas productoras de harina de pescado donde se toma como materia prima a una especie completa (anchoveta o sardina) o los residuos de otra (atún o salmón) (Cho y Kim, 2011), en esta investigación se combinan los desechos provenientes de 12 especies distintas, que son las procesadas en la zona de estudio.

Por lo tanto, el objetivo es realizar una investigación no experimental, empleando entrevistas no estructuradas a personajes clave para conocer la problemática en la región, y en una segunda fase, se propone una tecnología para el aprovechamiento de estos recursos.

## 1. Materiales y Métodos

El estudio se dividió en 2 etapas, la primera de ellas fue una investigación de campo, en el municipio de Puerto Peñasco, Sonora. La segunda, fue en el laboratorio de biotecnología y medio ambiente de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP) en Puebla.

### 1.1 La pesca en la zona de estudio

El municipio de Puerto Peñasco se encuentra en la zona noroeste del estado de Sonora, sobre las coordenadas geográficas 31°19'36" de latitud norte y 113°32'52" de longitud oeste del meridiano de Greenwich, con 57 342 habitantes (INEGI, 2010). En el municipio, la actividad económica principal es la pesca, se presentan en modalidad ribereña y de altura, ambas tienen que presentar una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) en su modalidad regional para poder pescar en el área Natural Protegida (ANP) de Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, que se encuentra en la parte norte del municipio y en donde se capturan especies de alto valor comercial.

La pesca de altura en Puerto Peñasco se conforma en 3 grupos de armadores que suman un total de 101 barcos. Los permisos de pesca son: i) camarón; ii) escama; y iii) tiburón. En el caso de los primeros dos, todas las embarcaciones cuentan con ambos permisos. Por su parte, sólo 6 unidades cuentan con permiso de tiburón, que cabe mencionar es descabezado en altamar y los especímenes traídos a tierra no generan desechos en el municipio, ya que, son comercializados enteros, caso similar al del camarón.

La pesca de altura se caracteriza por su baja selectividad, lo que provoca altos volúmenes de *bycatch* (peces u otras especies marinas capturadas, con o sin valor comercial, diferentes a las especies objetivo), de los cuales se obtiene buen porcentaje de la fauna de acompañamiento con valor comercial.

En la MIA presentada por uno de los grupos de armadores, se identificaron 111 especies capturadas como parte del *bycatch*, de las cuales el 89.9 % en número lo representó el grupo de los peces (López *et al.* 2007). Cabe mencionar que para la flota camaronera de Puerto Peñasco la relación de pesca de camarón/*bycatch*, oscila entre 1 /3.8 a 4.6, es decir, por cada tonelada de camarón capturada se obtienen de igual manera de 3.8 a 4.6 toneladas de *bycatch*, sin embargo, no se tiene la proporción del *bycatch* que es fauna de acompañamiento con valor comercial (Ambiente y Acuicultura, 2010).

Por su parte, el modo de operación de la pesca ribereña de Puerto Peñasco es mediante permisos de pesca, en estos se indican las especies objetivo de cada permiso, así como, el arte de pesca a emplear, por ejemplo: chinchorros, cimbras, trampas y buceo (Pérez-Valencia *et al.*, 2011). Es importante destacar que no todos son de interés para el estudio, ya que no generan residuos sólidos orgánicos en tierra. En el puerto existen dos grupos de pescadores, uno de ellos con 30 permisos y el otro con 132. De los permisos de pesca con mayor relevancia en la investigación son los de escama menor y tiburón, que representan el 80 % del volumen de pesca (Rivera-Núñez *et al.*, 2016). La fauna de acompañamiento de camarón, escama mayor, tiburón y lisa también aportan especies a procesar en tierra pero no se tiene cuantificada la relación pesca de objetivo/*bycatch* con valor comercial.

## 1.2 Estudio en campo

En el trabajo de campo se realizaron entrevistas no estructuradas a personajes clave en el proceso de generación y disposición de los residuos provenientes de la pesca en Puerto Peñasco. Se utilizó el método de bola de nieve para identificar a los actores y realizar las entrevistas (Hernández-Sampieri, 2013). Las encuestas se aplicaron en el siguiente orden: 1) a pescadores que trabajan tanto en flota mayor como en flota menor, ya que, solo se manejan esas dos modalidades de pesca en el puerto; 2) a fileteadores y dueños de las plantas procesadoras de pescado; 3) los pepenadores del relleno sanitario municipal y 4) el encargado de la compañía con la concesión para operar el relleno sanitario municipal.

Como complemento en estudio de campo se cuantificó en las diferentes plantas procesadoras identificadas en el apartado anterior, el volumen de generación de residuos anual. Se aplicó al personal de cada planta procesadora un formato de cuadro informativo donde mencionaban la cantidad de residuos que se generaban en la empresa cada mes. Es importante recalcar que las empresas no tienen un registro formal de ello, tampoco la administración del relleno sanitario, en pocas palabras no se tiene información al respecto.

## 1.3 Elaboración de harina de pescado

### 1.3.1 Muestreo

La recolección de la muestra se llevó a cabo en dos momentos. La primera fue en agosto 2016 donde se recolectaron 3 lotes de 2 kg cada uno, del área de desechos de la planta procesadora “Pescados y mariscos el Fokin”. La segunda fue en marzo 2017 donde se recolectaron 3 lotes de 2 kg cada uno del área de desechos de la planta procesadora “Tres hermanos”. Una vez recolectadas las

muestras fueron empaquetadas al vacío y congeladas a -25 °C para su transporte. Se seleccionaron muestras aleatorias para tener diferentes concentraciones de las partes y las especies desechadas.

### **Proceso de elaboración de harina de pescado en el laboratorio**

Se adaptó un proceso de producción de harina de pescado (Elavarasan, 2018), véase Fig. 1. Se trabajaron 6 lotes de 2 kg. Como primer paso, se tomó la muestra previamente congelada y se descongeló a temperatura ambiente por un día. Posteriormente, se calentó en una relación 1:1.2 agua/sólidos de pescado por 20 minutos a una temperatura de 100 °C con el objetivo de coagular las proteínas y eliminar el contenido de microorganismos contaminantes. A continuación, se coló para obtener el producto hidrosoluble y la torta de queque (parte sólida) que fue prensada para reducir su contenido de líquido. La torta de queque se puso a secar en un horno eléctrico a una temperatura de 100 °C por 24 horas. La muestra saliente del horno pasó 24 horas en un refrigerador a 4 °C para bajar su temperatura, y poder ser molida en una licuadora industrial para reducir su tamaño de partícula. La reducción de partícula fue hasta pasar el tamiz #10 US.

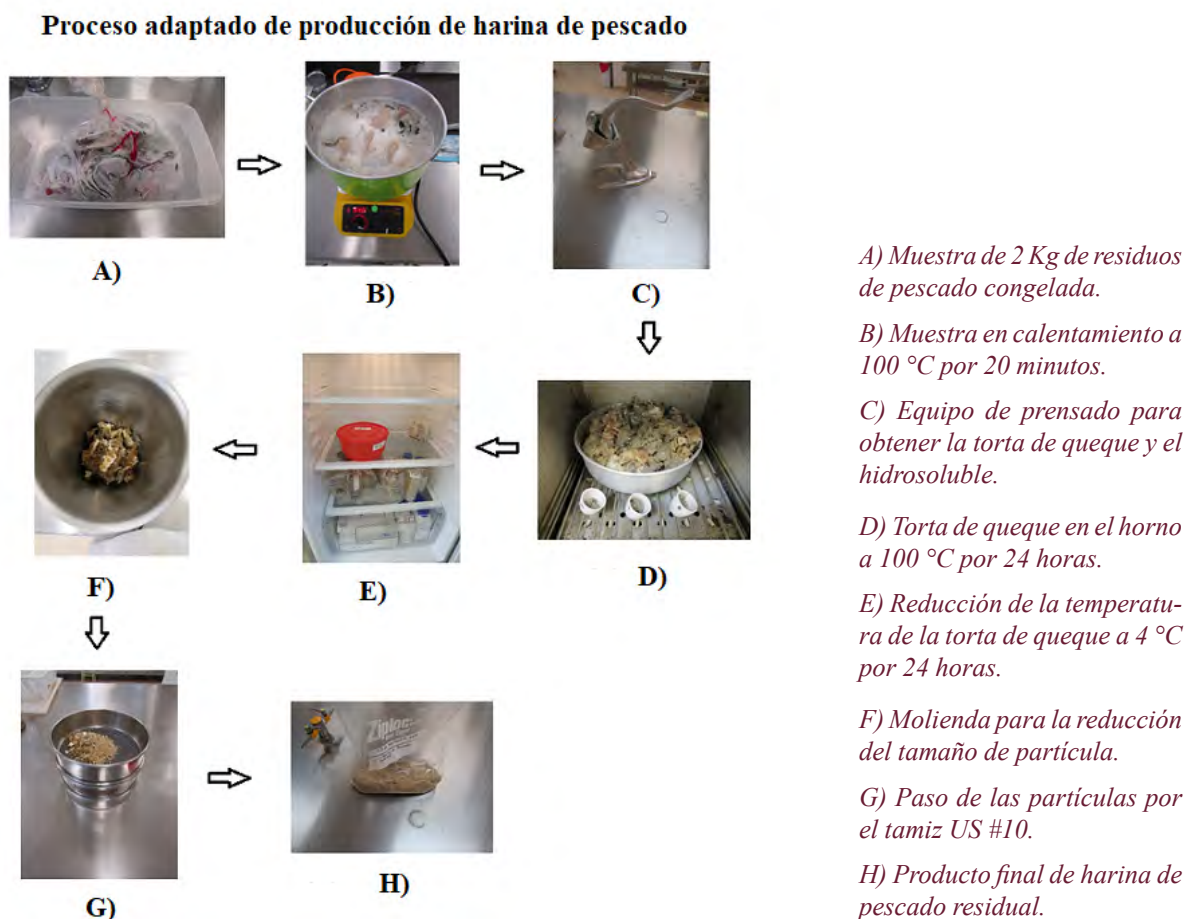
#### **1.3.2 Análisis Bromatológicos**

Una vez estandarizada la harina de pescado se realizaron los análisis bromatológicos de acuerdo al AOAC (2005). En la *TABLA 1* se menciona la técnica de determinación para cada nutriente del estudio bromatológico.

**Tabla 1. Metodología utilizada en el estudio bromatológico (AOAC, 2005).**

| Nutriente a determinar ( %)   | Técnica de determinación                       |
|-------------------------------|------------------------------------------------|
| Humedad                       | Secado a 105 °C                                |
| Cenizas                       | Calcinación a 600 °C                           |
| Extracto Etéreo o Grasa Cruda | Goldfish                                       |
| Proteína Cruda                | Macro Kjeldahl                                 |
| Fibra Cruda                   | Fibrotherm                                     |
| Fósforo                       | Bray y Kurts                                   |
| Sodio                         | Equipo de absorción atómica, emisión de llama  |
| Potasio                       | Equipo de adsorción atómica, emisión de llama  |
| Calcio                        | Equipo de adsorción atómica, lámpara de calcio |

Figura 1. Diagrama del proceso adaptado de producción de harina de pescado, nivel laboratorio.



## 2. Resultados y Discusiones

### 2.2 Proceso de generación y disposición

Todo arribo pesquero en Puerto Peñasco, Sonora proviene de alguna embarcación de la flota menor o mayor y debe de cumplir con los requerimientos de tallas mínimas y respetando las temporadas de vedas. Al llegar a puerto, la captura puede tener dos caminos: i) son llevados a las plantas procesadoras locales, en algunos casos pertenecen a los mismos propietarios de las embarcaciones pesqueras, también existen algunos dueños de procesadoras que tienen contratos de compra establecidos con dueños de barcos y pangas, asegurando la compra de sus capturas; o ii) son vendidos y transportados de manera directa, sin recibir procesamiento, a compradores fuera del municipio, véase la Fig.2, esta operación la realizan tanto los dueños de plantas procesadoras como los propietarios de las embarcaciones. Cuando la pesca se comercializa de manera directa no genera ningún residuo orgánico en el puerto.

Debido a la falta de personal que fileteé se está generando una tendencia de comercializar las especies de manera completa. Los dueños de las procesadoras mencionaron que la diferencia del precio de venta de especies completas y en filetes en ocasiones apenas alcanza a cubrir la mano de obra. Adicionalmente, las nuevas generaciones no muestran interés en realizar esa actividad.

Figura 2



*Al lado izquierdo se observa la especie procesada, generadores de residuos en el puerto.*

*En el lado derecho se aprecia la comercialización de especies completas, sin generar residuos en el puerto.*

Las especies procesadas en el municipio varían de acuerdo a las temporadas de pesca. La temporada principal para el fileteo son los meses de enero a marzo y de agosto a diciembre, donde cochito (*Balistes polylepis*), lenguado (*Paralichthys aestuarius*), angelito (*Squatina californica*), guitarra (*Rhinobatos productus*), mantas (*Dasyatis dipterura*, *Gymnura marmorata*, *Myliobatis californica*, *M. longirostris*), tiburón bironcha (*Rhizoprionodon longurio*) y tiburón tripa o cazón (*Mustelus lunulatus*, *Mustelus henlei*) son las más abundantes, adicionalmente algunas procesadoras trabajan la merluza (*Merluccius sp*) en los meses de enero y febrero. En los meses de mayo a julio disminuye, las plantas que llegan a procesar se concentran en el cochito y lenguado, aunque en la mayoría de los casos los dueños prefieren no pagar mano de obra y comercializar las especies completas.

Las partes desechadas son cabezas, colas, pieles, vísceras, esqueletos y cartílagos, en el caso del cochito adicionalmente un músculo pequeño. Los porcentajes de desechos oscilan entre un 40 % y 60 %, está en función de la especie en cuestión, la técnica y experiencia del fileteador. Ninguna de las plantas procesadoras cuenta con registros al respecto. Sin embargo, la mayoría conoce los fileteadores que logran obtener una mayor cantidad de filetes y reducen la generación de residuos.

La disposición de los residuos generados es responsabilidad de cada planta procesadora. El gobierno municipal mantiene una concesión del relleno sanitario con una empresa privada. Es importante hacer mención de las condiciones de operación, muy similares a las de un tiradero a cielo abierto. No cuenta con geo membrana, laguna de lixiviados o alguna medida de control de contaminantes, véase FIGURA. 3. Para realizar la disposición las empresas deben invertir tiempo, personal, medio de transporte, combustible y adicionalmente pagar una cuota de \$100.00 pesos mexicanos (5 USD\$) por tonelada dispuesta. El costo se considera preferencial y es gracias a un convenio de trabajo logrado con apoyo del municipio.

Por último, la empresa encargada de la concesión no designa un área específica de disposición para residuos pesqueros dentro del relleno. Al entrar, cada empresa decide el lugar donde va a disponer sus residuos, lo que genera una combinación con los residuos sólidos urbanos provenientes de casa habitación y que podrían ser aprovechados.



Figura 3.



*En la parte superior izquierda se aprecia el mecanismo de disposición de la planta procesadora “El Fokín”. Arriba a la derecha centro se puede observar la disposición de residuos en el relleno sanitario. Abajo en el lado izquierdo se ejemplifica como los residuos de la pesca se combinan con los residuos sólidos urbanos en el relleno sanitario municipal.*

### 2.3 Cuantificación de volúmenes de generación

Se identificaron 9 plantas procesadoras de pescado en el municipio, las cuales generan un promedio anual de 872.5 toneladas, véase FIG. 4 y FIG.5, donde se muestran los resultados de producción promedio de residuos por mes y el porcentaje de generación de cada planta procesadora. En los meses de agosto y marzo, es cuando se produce la mayor cantidad de residuos. Tan solo entre la planta procesadora “El Fokín” y “Tres hermanos” aportan el 60 % de los residuos del puerto. En contraparte, cuatro plantas combinadas no logran sumar siquiera el 10 % de los residuos. Es relevante indicar que algunos pescadores realizan fileteo en sus casas y los residuos son mezclados con los sólidos urbanos y recolectados por el sistema municipal o bien son tirados en lotes sin construcción cercanos a sus casas. En cualquiera de los últimos dos escenarios los volúmenes son menores.

Figura 4. Producción en toneladas de residuos por mes y por pescadería, de las 9 plantas procesadoras identificadas en Puerto Peñasco, Sonora.

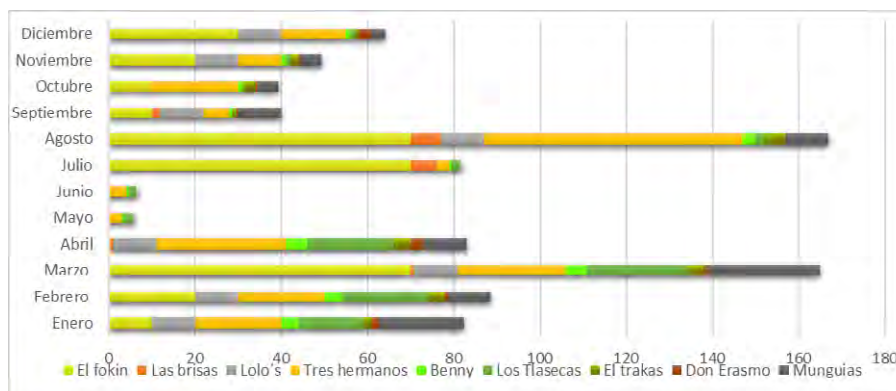
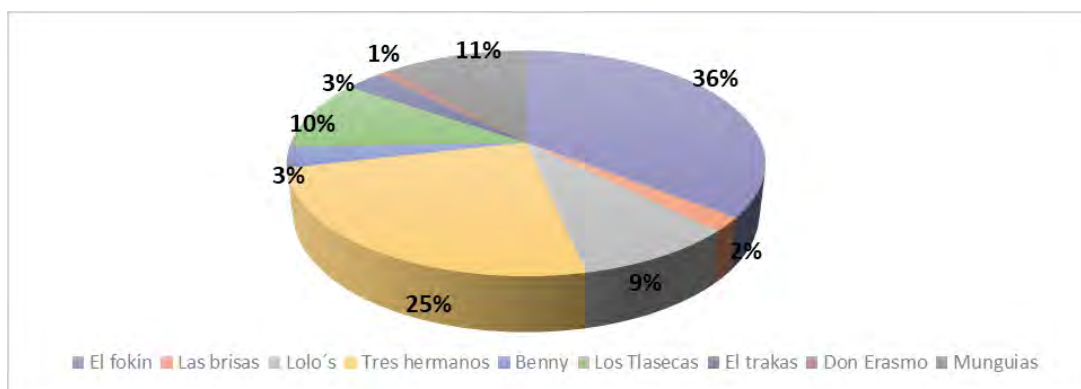




Figura 5. Producción en porcentaje de generación de residuos anual de cada una de las 9 plantas procesadoras identificadas en Puerto Peñasco, Sonora.



## 2.4 Calidad de la harina de pescado residual producida

Los resultados obtenidos en el estudio bromatológico realizados a la harina de pescado elaborada a nivel laboratorio con el proceso adaptado resultaron ser muy prometedores y muestran una viabilidad alta. A pesar que no se utilizaron equipos especializados, se obtuvieron valores nutricionales muy cercanos a lo que dictamina la norma, en especial en la proteína que resulta ser el nutriente de mayor relevancia para este tipo de alimento. En la *TABLA 2* se pueden comparar los resultados de la harina de pescado producida en esta investigación con otras dos harinas de tipo comercial y que utilizan de especies completas, se debe hacer mención que con harinas de calidad estándar no Premium, además se muestran los contenidos nutricionales establecidos por la NMX-Y-015-SCFI-2006, que indica el contenido nutricional para la comercialización de harina de pescado para alimentación animal.

Los puntos básicos a resaltar son: 1) Ninguna de las harinas comerciales ni la producida en esta investigación cumplieron con todos los requerimientos de la norma; 2) El contenido proteico de la harina de esta investigación es superior a una de las harinas comerciales; 3) Ninguna de las harinas cumple el máximo de fósforo; 4) La harina de la investigación y una de las comerciales no cumplen con el contenido máximo de cenizas; y 5) La única harina que no cumple el mínimo de grasas y el máximo de fibra es la producida en esta investigación. En el mismo sentido se debe de recalcar la afirmación de la FAO (2020), indicando que cualquier incremento en la producción de harina y aceite de pescado a nivel mundial debe de provenir de la utilización de residuos como su materia prima.

Tabla 2. Contenido nutricional de la harina de pescado obtenida de los residuos de pescado de Puerto Peñasco, Sonora

| Parámetro      | Harina de pescado de la investigación (%) | Harina de pescado de Alpasa (%) | Harina de pescado de Engormix (%) | NMX-Y-015-SCFI-2006 (%) |
|----------------|-------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Proteína cruda | 56.86 ± 5.19                              | 60.0-62.0                       | 50.0-55.0                         | Mín. 60.0               |
| Grasa cruda    | 3.05 ± 1.00                               | 7.0-9.0                         | 14.0-15.0                         | Mín. 6.0                |

|                  |              |           |       |          |
|------------------|--------------|-----------|-------|----------|
| Fibra cruda      | 9.15 ± 4.63  | Máx. 1.0  | 0.28  | Máx 1.0  |
| Humedad          | 2.62 ± 0.91  | 7.0-9.0   | 6.11  | Máx 10.0 |
| Cenizas          | 28.43 ± 1.16 | 19.0-21.0 | 13.22 | Máx 19.0 |
| Calcio           | 4.30 ±       | Máx. 6.5  | 7.0   | Máx 5.5  |
| Fósforo          | 5.98 ± 3.04  | Mín. 2.5  | 3.56  | Máx 2.5  |
| Cloruro de Sodio | 0.65 ± 0.28  | 1.38      | -     | Máx 2    |

El principal aporte de la harina de pescado en las dietas animales es la proteína. La variación en el contenido por especie es mínima. Por ejemplo, Merluza (*Merlucius merlucius*) 17 %, Anchoveta (*Engraulis ringens*) 18 %, Arenque de primavera (*Clupea harengus*) 18 % (FAO, 1986), Sardina (*Clupea pilchardus*) 19 % (Lupín, 1981). No representa una variación considerable a la hora de elaborar harina de pescado, siempre que se utilice la especie completa. Un incremento en la cantidad de cenizas en la harina puede ser originado por la composición residual de su materia prima o una talla pequeña de las especies utilizadas (Tanikawa, 1980). Lo anterior explica el casi 57 % en proteína y el 28.5 % de cenizas en la harina residual de la investigación, que se encuentran fuera de rango respecto a otras harinas que utilizan especies completas.

La proteína resulta superior a otras realizadas con desperdicios. Un 48.7 % en un experimento de elaboración de harina de pescado con residuos de mojarra roja (*Oreochromis sp*) (Embus-Clavijo, 2017), o la harina de pescado artesanal con 50.8 % de Valdés-García *et al.*, (2016). Se asemeja al promedio de las harinas elaboradas con alto contenido de residuos, pero que también utiliza especies completas, en el país de Venezuela (56.87 %) que menciona Cabello *et al.* (2013).

El tiempo de espera entre la captura y el procesamiento de los peces puede producir cambios físicos y químicos que modifiquen la calidad del producto final (Zaldívar, 1992). En el caso de residuos el tiempo de espera es mayor, ya que, primero debe de pasar por un procesamiento para su generación. Se estima que un 70 % del rendimiento del producto final radica en la frescura de la materia prima (Zaldívar, 1994). La calidad de la harina elaborada se podría mejorar, sería necesario implementar un proceso más efectivo. Las condiciones de presión y temperatura en la cocción influyen en el contenido proteico, en especial en la disponibilidad de aminoácidos, a una menor temperatura se obtiene mayor digestibilidad (Terrazas *et al.* 2005). En el mismo sentido, una temperatura de secado excesiva modifica la calidad y cantidad de nutrientes (Zaldívar, 1995; Díaz, 1996).

### 3. Conclusiones

- i. La cantidad de residuos orgánicos procedentes de las plantas procesadoras del municipio de Puerto Peñasco, Sonora es de 872.5 toneladas anuales. Al tomar en cuenta el 20 % de rendimiento en la producción, se pueden generar 175 toneladas de harina de pescado anuales de calidad estándar, misma que se puede mejorar al contar con maquinaria especializada. Es importante considerar que, la cantidad de pescado procesado puede variar en función de la pesca, la mano de obra disponible y la diferencia de costo entre filete y pescado completo en el mercado nacional, por ello, la producción puede ser aún mayor en años de volúmenes altos de pesca y buenos precios de filetes. El costo de la harina de pescado puede variar, sobre todo en el mercado nacional y sin intermediarios. Con un costo promedio de \$10.00 pesos por kilogramo, se pueden agregar

\$1,750,000.00 (menos costos de producción) a la economía local. Adicionalmente, se debe de considerar el impacto ecológico y ambiental, así como de salud, que genera la disposición actual de los residuos.

- ii. Es importante analizar la factibilidad de incluir un proceso previo de separación de residuos que permita crear productos de mayor valor comercial. El estudio de factibilidad debe incluir, por lo menos, la cantidad de residuo generado, la fluctuación en su producción, es decir, los cambios en el costo de la especie completa y su filete, la disponibilidad y costo de la tecnología para su aprovechamiento, los requerimientos de capital intelectual para su operación, el nicho de mercado que puede abordar el producto y las ganancias potenciales. En caso de no ser redituable en alguno de esos factores, se debe omitir la producción e incluir al residuo dentro de la harina de pescado. Los productos que aporten a la soberanía alimentaria de la región deben de ser producidos independientemente de la factibilidad económica, ya que, la alimentación debe ser concebida como una garantía para la población y no se puede dar prioridad al beneficio económico sobre ella.
- iii. Del mismo modo que Puerto Peñasco es una ciudad pesquera que genera un promedio de 872.5 toneladas de residuos provenientes del procesamiento de la pesca, y que, están siendo dispuestos de manera incorrecta a pesar de su alto potencial de revalorización. Existen otros puertos a lo largo de las costas mexicanas que producen cantidades considerables de residuos de la misma índole, que están siendo dispuestos de manera errónea y que tienen un alto potencial de reintegración bajo el concepto de economía circular. Es relevante avanzar en dos direcciones: a) Identificar los puertos del litoral mexicano que tienen altos volúmenes de pesca y analizar caso por caso la manera y el volumen de generación de residuos; b) Desarrollar tecnología acorde a las necesidades del contexto mexicano, es decir, producir maquinaria para la elaboración de harina de pescado de bajo costo, alta eficiencia y que permita fluctuaciones en el volumen de producción. El último punto puede centrarse en micro plantas de producción para cada empresa procesadora de pescado o pensar en plantas de mayor tamaño y considerar un proceso centralizado en cada municipio.

## 4. Referencias

- Alpessa Guadalajara. (2012). *Harina de pescado nacional. Ficha técnica*. Disponible en: [https://apelsaguadalajara.com.mx/pdf/harina\\_pescado.pdf](https://apelsaguadalajara.com.mx/pdf/harina_pescado.pdf). Accesado: 21 septiembre 2020.
- Ambiente y Acuacultura. (2010). *Pesca sustentable de Camarón Azul y Café y Reconversión Productiva en el Alto Golfo de California*. México.
- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis of AOAC International*. In Association of Official Analysis Chemists International.
- Benton-Short, L., & Short, J. R. (2008). *Cities and nature /by Lisa Benton-Short and John Rennie Short*. In Routledge critical introductions to urbanism and the city. London : Routledge.
- Cabello, A., García, A., Figuera, B., Higuera, Y. & Vallénilla, O. (2013). *CALIDAD FÍSICO-QUÍMICA DE LA HARINA DE PESCADO VENEZOLANA*. SABER. Revista Multidisciplinaria Del Consejo de Investigación de La Universidad de Oriente.
- Cho, J. H., & Kim, I. H. (2011). *Fish meal - nutritive value*. In *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2010.01109.x>
- CONAPESCA. (2013). *Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca*. Edición 2013. Mazatlán, Sinaloa México.
- Díaz, A. N. (1996). *Elaboración de harina de pescado de alta calidad*. Curso de operación, producción con calidad. Concepción, Chile.
- Elavarasan, K. (2018) *Fish Meal and Oil from Fish Waste: An Industrial Perspective*. En: *Protocols for the production of high value secondary products from industrial fish and shellfish processing*, Bindu, J., Sreejith,

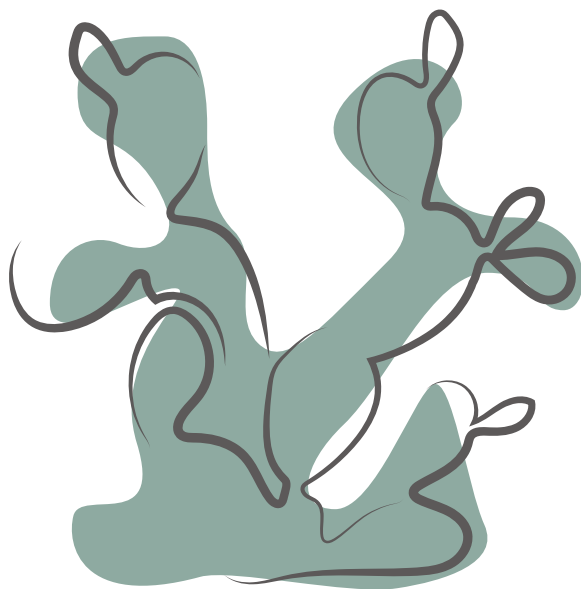
- S., and Sarika, K. (eds.), Pp. 53-61. Central Institute of Fisheries Technology, Cochin, India.
- Embus Clavijo, N. (2017). Elaboración de harina de vísceras de pescado (HVP) mojarra roja (*Oreochromis sp*) y determinación de su composición nutricional, Como fuente alimenticia para animales en Garzón (Huila). *Revista de Investigaciones Agroempresariales*. <https://doi.org/10.23850/25004468.831>
- Engormiox. (2020). Balanceados-Piensos. Harina de pescado. Disponible en: [https://www.engormix.com/MA-balanceados/productos/harina-pescado\\_pr31253.htm](https://www.engormix.com/MA-balanceados/productos/harina-pescado_pr31253.htm). Accesado: 21 septiembre 2020.
- FAO. (1986). Producción de harina y aceite de pescado. Roma. <https://doi.org/92-5-102464-2>
- FAO. (2020). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. En: El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>
- Hernández, J. S. (2013). Metodología de la Investigación. In *Journal of Chemical Information and Modeling*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- INECC. (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático/Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Inegi. (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kim, S. K., & Venkatesan, J. (2014). Introduction to seafood processing by-products. In *Seafood Processing By-Products: Trends and Applications*. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9590-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9590-1_1)
- LPGIR (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Cámara de Diputados. Publicación Oficial, México.
- López, M. J., Hernández, V. S., Herrera, V. E., Rábago, Q., & Morales, A. R. (2007). Efectos ecológicos de la pesca de arrastre de camarón en el Golfo de California. Estado del arte del desarrollo Tecnológico de las Artes de Pesca. En: La situación del sector pesquero en México, CEDRSSA (Ed.) Pp.14-47. CEDRSSA y Cámara de diputados LX Legislatura. México.
- Lupín, H. M. (1981). Composición del músculo de pescado. CITEP. Mar del Plata, Argentina.
- Misra, V., & Pandey, S. D. (2005). Hazardous waste, impact on health and environment for development of better waste management strategies in future in India. In *Environment International*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.08.005>
- Olsen, R. L., Toppe, J., & Karunasagar, I. (2014). Challenges and realistic opportunities in the use of by-products from processing of fish and shellfish. In *Trends in Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.01.007>
- Pérez-Roda, A., Gilman, E., Huntington, T., Kennelly, S. J., Suuronen, P., Chaloupka, M., & Medley, P. (2019). A third assessment of global marine fisheries discards. In *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. No. 633.
- Pérez-Valencia, S., Gorostieta-Monjaraz, M., Castañeda-Fernández de Lara, V., Loaiza-Villanueva, R., Turk-Boyer, P., et al. (2011). Manifestación de Impacto Ambiental para la pesca ribereña responsable en la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado: Costa Este. Puerto Peñasco, Sonora. Puerto Peñasco, Sonora: Centro Intercultural de Estudios de Desiertos y Océanos, A.C. (Eds) Sonora, México.
- República Del Perú (2014). Decreto supremo N. 006-2014-PRODUCE. Se establecen las disposiciones para el fortalecimiento del marco regulador de la actividad de procesamiento de los descartes y los residuos de los recursos hidrobiológicos y aprueba el Régimen de adecuación de las plantas de aprovechamiento. Perú.
- Rivera-Nuñez, T., Castro-Salcido, E., Francois, S., Rivera-Nuñez, I. Piñeda, T., Escalante, R., Gonzalez-kuk, G. (2016). Manifestación de Impacto Ambiental para la Pesca Ribereña Sustentable de Puerto Peñasco en la Porción Oriental de la Zona de Amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. Particular. Sonora, México.
- Sáez, A. y Urdaneta, J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Omnia.
- SCFI. (2006). NMX-Y-015-SCFI-2006. Diario Oficial de La Federación. México.
- SEMARNAT. (2011). NOM-161-SEMARNAT-2011. Diario Oficial de La Federación. México. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Terrazas F. M.M., Ávila G.E., C. G. M. & N. S. H. (2005). Efecto de la incorporación de harina de pescado con distinto grado de cocción a dietas para pollos de engorda formuladas a un perfil de aminoácidos digestibles. *Técnica Pecuaria En México*, 43, 297–308.

Valdés-García, Y., Núñez-González, L., Escalera-Valente, F., Plascencia-Jorquera, A., Barreras-Serrano, A., Corona-Gochi, L., Gómez-Danés, A., & Loya-Olguin, J. (2016). Efecto del reemplazo de pasta soya por harina de pescado elaborada manualmente sobre comportamiento productivo de ovejas Pelibuey lactando y sus crías. *Archivos de Medicina Veterinaria*. <https://doi.org/10.4067/s0301-732x2016000200005>

Zaldívar L., J. (1992). Criterios de calificación de harinas de pesca. *Chile Pesquero*. 71:43-47.

Zaldívar L., J. (1994). Nuevas tendencias a las harinas especiales. *Chile Pesquero*. 82:52-58.

Zaldívar L., J. (1995). Calidad y competitividad de las harinas de pescado chilenas. *Chile Pesquero*. 85:51-55.





# Caracterización y Aprovechamiento del Suero de Quesería en la Elaboración de Bebidas para Adultos y para Niños.

Aguilar Ros I. D.<sup>1</sup>  
Pérez Márquez M. O.<sup>1</sup>  
Vélez Ruiz J. F.<sup>1,2\*</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Ingeniería Química e Ingeniería en Alimentos, Universidad de las Américas Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, C.P. 72810. MÉXICO.

<sup>(2)</sup> Food Network Consultores, Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica, Blvd. del Niño Poblano 2901. Unidad Territorial Atlixcáyotl, Puebla, Puebla, C.P. 72430. MÉXICO.

\* Correspondencia  
JFVR, 0000-0003-1526-0.989X,  
jorgef.velez@udlap.mx; Tel 222 2370117

El suero de leche es un subproducto resultante de la industria quesera, es un material contaminante con alta demanda biológica de oxígeno, con capacidad nutricional para el ser humano, contiene proteínas, lactosa, minerales y sales. Existen diversos procesos y estudios que plantean opciones de uso, nuestra contribución fue investigar su aprovechamiento en la elaboración de dos bebidas, una para adultos y otra para niños. Experimentalmente se efectuó la caracterización fisicoquímica y microbiológica de un lactosuero industrial, que se utilizó en la formulación de bebidas. En la primera parte se empleó suero, a cuatro niveles de sólidos (8, 10, 12, 14 % p/p) y tres pH (3.0, 3.5, 4.0), para formular bebidas con sabores cereza, limón, naranja y piña, de las cuales se seleccionó la de sabor limón por sus buenas características y buena aceptación sensorial, para adultos; analizando su estabilidad durante 5 semanas a 15, 25 y 35 °C. En la segunda parte, se utilizó suero en polvo a concentraciones 10, 12.5 y 15 % (p/p), para preparar bebidas para consumo infantil, sabores fresa y naranja, que también se caracterizaron fisicoquímica y microbiológicamente, realizando una evaluación sensorial inicial con niños. Con base en los resultados y observaciones obtenidos en esta parte, se prepararon sabores fresa y naranja, para analizar su estabilidad en condiciones ambientales y en refrigeración; a temperatura ambiente la vida de anaquel fue de siete días, mientras que a temperatura de refrigeración resultó de dos semanas, la evaluación sensorial final se llevó a cabo sólo con adultos. Los resultados y conclusiones obtenidas en ambas etapas (formulación de las bebida para adultos, y para niños) establecieron las bases técnicas de preparación a partir de suero, con posibilidades de aprovechamiento y de potencial explotación comercial; lo cual repre-

sentaría enormes beneficios para la sociedad, por la utilización de un subproducto industrial, la menor contaminación ambiental y el potencial consumo humano.

**Palabras clave:** suero de quesería, aprovechamiento de suero, caracterización del suero, bebidas no alcohólicas, subproducto industrial.

## Introducción

El suero o lactosuero es un subproducto de la industria láctea o quesera, es un líquido opaco de color amarillo-verdoso con un contenido de sólidos importante (5 a 6 %) que incluye proteínas, lactosa, minerales y sales. Se generan alrededor de 9 kilogramos de suero por cada kilogramo de queso producido; es un material contaminante con alta demanda biológica de oxígeno, con capacidad nutricional para el ser humano y cuyo aprovechamiento es limitado (Poveda, 2013; Vélez Ruiz, 2017).

Debido a la gran producción de quesos a nivel mundial (más de 18 millones de toneladas por año), puede uno deducir la cantidad de suero que se desperdicia diariamente en todo el mundo (más de 145 millones de toneladas en 2011), y en México en particular. Aunque hay varios países, que aprovechan el suero, solo representan pequeñas cantidades; el resto se desecha y representa una fuente de contaminación ambiental (Poveda, 2013).

Consecuentemente, la sociedad, la industria y los investigadores, han propuesto alternativas y formas para la utilización del suero, a lo largo de los años. Debido al crecimiento poblacional y a la falta de alimentos que se presenta hoy en día a nivel mundial, lo esperado sería regresar ese suero a la cadena alimenticia de una forma aprovechable. Por otro lado, la contaminación ambiental a nivel mundial es preocupante y el suero quesero al ser desperdiciado y tirado, constituye una fuente de contaminación, precisamente por la presencia de compuestos orgánicos, que debería ser eliminada (Vélez Ruiz, 2017; Osorio-González *et al.*, 2018).

El suero de leche es un producto altamente nutritivo, el cual ha sido usado para propósitos múltiples. Se ha empleado con propósitos terapéuticos (artritis y gota, entre otros) en siglos anteriores; debido a la presencia de proteínas, minerales y vitaminas. Puede ser aprovechado para la elaboración de productos de consumo con valor nutritivo; principalmente, se ha utilizado la tecnología de concentración y secado para elaborar concentrados, aislados y suero en polvo. También se ha aplicado la tecnología de extracción o separación para obtener lactosa, grasa, ácidos orgánicos, calcio de alta disponibilidad y enzimas. Por otro lado, se han aplicado métodos fermentativos que han permitido obtener biomasa e hidrolizados, incluso se ha generado etanol o biocombustible. Varios autores han sugerido que el suero puede ser utilizado en la formulación de bebidas nutritivas, bebidas ricas en proteínas, bebidas funcionales y bebidas fermentadas, entre otros productos. El interés universal por aprovechar este subproducto es creciente, de tal suerte que el número de opciones o posibilidades ha aumentado; se han elaborado películas comestibles como un producto novedoso. Aunque los costos de las tecnologías de aprovechamiento son muy altos (Poveda, 2013; Vélez Ruiz, 2017; Chandrajith y Karunasena, 2018).

El objetivo de este capítulo de revisión es presentar un panorama general del suero, resaltar sus características y propiedades, así como de las opciones de uso que han sido planteadas para este subproducto, con la inclusión de algunos trabajos experimentales. Se presentan los principales resultados obtenidos en la preparación de dos bebidas no fermentadas, una para adultos y otra para niños, a partir del suero; incluyendo su caracterización, la formulación de las bebidas, los estudios de estabilidad y su evaluación sensorial. Todo esto con el propósito de informar, orientar y ayudar a gente interesada en el aprovechamiento del suero.

## 1. Suero de Quesería

### 1.1 Definición y Características

El suero es el residuo líquido, resultante de la remoción de caseína y grasa de la leche durante el proceso de elaboración de queso (Webb y Johnson, 1991; Smit, 2003). Es una fuente de proteínas, carbohidratos, minerales de alta calidad y biológicamente activos, es rico en lactosa y su contenido graso depende mucho de la leche utilizada y del proceso de elaboración del queso. Además, contiene vitaminas C y B. Su color es amarillo-verdoso debido a la presencia de vitamina B2 y lactoflavina (Spreer, 1991; Chandrajith y Karunasena, 2018).

De acuerdo, a Kessler (1981), Smit (2003) y Osorio-González *et al.* (2018), el suero está compuesto de los siguientes nutrientes, provenientes de la leche:

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>a) Proteínas, principalmente se encuentran la beta-lactoglobulina y la alfa-lactoalbúmina, normalmente representan un 10 % de los sólidos.</p> <p>b) Nitrógeno no proteico, de bajo peso molecular. No es un componente importante.</p> <p>c) Lactosa, constituye el 82 % de los sólidos y es separable por cristalización, está formado por</p> | <p>glucosa y galactosa.</p> <p>d) Minerales, entre los que se encuentran calcio, magnesio, potasio y sodio; y sales como fosfatos, citratos, cloruros, sulfatos y bicarbonato. Estos representan el 8 % de los sólidos.</p> <p>e) Vitaminas de tipo hidrosoluble, C y B.</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Dependiendo del origen de la leche (búfala, cabra, vaca), del tipo de queso elaborado, y de las variaciones en el proceso de producción, se generan diferentes tipos de suero. En base a su acidez, la clasificación general de este material es en suero dulce y suero ácido, tomando en cuenta el proceso utilizado para la separación de la caseína, ya sea por acción del cuajo (renina) o por acción ácida, consecuentemente sus características y su composición difieren notablemente (Kosikowski, 1979, 1982; Smit, 2003; Ramos *et al.*, 2016).

El suero ácido, también llamado suero por acidificación, surge de la coagulación ácida natural, en donde el ácido láctico separa al calcio y la caseína, contiene lactato de calcio. Normalmente es el residuo resultante en la fabricación de quesos frescos o de pasta blanda, la acidificación también se puede lograr por la adición de ácidos orgánicos para acelerar el proceso de precipitación. Este tipo de suero tiene un pH menor y por lo tanto una vida de anaquel más duradera que el suero dulce. Los sueros ácidos presentan más variaciones en su composición, con un contenido menor de lactosa y mayor en sales minerales que los encontrados en los sueros dulces (Veisseyre, 1980; Spreer, 1991; Smit 2003; Ramos *et al.*, 2016; Vélez Ruiz, 2017).

El suero dulce, es producto del desdoblamiento del complejo caseína-calcio por acción enzimática, por lo que las proteínas siguen unidas al calcio, su pH es de aproximadamente 6.45. Es el tipo de suero principalmente generado por la Industria Láctea, contiene aproximadamente 63.7 g de materia seca por litro, de los cuales 45-50 g son de lactosa, 7-9 g son de material nitrogenado, 6-8 g son de sales y 1-2 g corresponden a la grasa (Spreer, 1991; Smit, 2003). Por ejemplo, el suero resultante de la elaboración de queso Cheddar contiene típicamente, 93.2 % de agua, 5.1 % de lactosa, (incluyendo ácido láctico) 0.9 % de proteína y compuestos nitrogenados, 0.5 % de cenizas y 0.3 % de grasa.

El almacenamiento del suero durante un tiempo considerable (días), resulta en un decremento en lactosa, un incremento en acidez y rompimiento de los compuestos nitrogenados (Webb y Johnson, 1991). La composición de ambos tipos de suero (Kessler 1981; Spreer, 1991; Chandrajith y Karunasena, 2018) se presenta en la *TABLA 1*.

**Tabla 1. Composición proximal de los dos tipos de suero fresco**

| Componente o propiedad | Suero dulce      | Suero ácido     |
|------------------------|------------------|-----------------|
| Agua ( %)              | 93 – 94          | 94 – 95         |
| Extracto seco ( %)     | 6 – 7            | 5 – 6           |
| Lactosa ( %)           | 4-5 – 5          | 3.8 – 4.2       |
| Ácido láctico ( %)     | trazas           | 0.8             |
| Proteínas ( %)         | 0.8 – 1.0        | 0.8 – 1.0       |
| Ácido cítrico ( %)     | 0.1              | 0.1             |
| Cenizas ( %)           | 0.5 – 0.7        | 0.7 – 0.8       |
| pH                     | 6.45 (6.2 – 6.6) | 5.00 (4.5 -4.7) |
| Densidad (kg/L)        | 1.026 (15 °C)    | 1.025 (15 °C)   |

Kessler (1981); Spreer (1991); Chandrajith y Karunasena (2018)

A nivel mundial se estima que se producen 190 - 200 millones de toneladas de suero por año, con un crecimiento observado de 2 % en los últimos 10 años; Europa genera el 50 %, Estados Unidos 3 % y México 0.6 %. Es decir, alrededor de 1.14-1.20 millones de toneladas son producidas en México (FAO, 2017), lo que se ha venido realizando por años y representa una fuente de contaminación ambiental enorme, con alta demanda de oxígeno por la presencia de compuestos de carácter orgánico; existe por ello, un potencial enorme de utilización. Su aprovechamiento en primera instancia contribuye o contribuirá a la elaboración productos alimenticios y separación de compuestos, con diferentes características, para el consumo humano, y su utilización también ayuda o ayudará a la eliminación de un fluido altamente contaminante. En un futuro inmediato o cercano, puede servir para producir agua potable, mejorando la tecnología de separación, tanto en el aspecto técnico, como en la economía (Vélez Ruiz, 2017).

## 1.2 Utilización del Suero, Productos

La industria láctea y especialistas en Ciencia de Alimentos han investigado durante años, diversas opciones o procesos de aprovechamiento de los desechos industriales. Los desechos de las industrias lácteas, como el suero, presentan un nivel muy alto de demanda biológica de oxígeno y por lo tanto es un producto que contamina las aguas o ríos en los que se derrama. Además, el suero tiene alto contenido de lactosa y bajo ciertas condiciones es difícil minimizar la producción de ácido y prevenir la formación de olores. Los microorganismos deben oxidar el carbono e hidrógeno de los compuestos orgánicos y convertirlos a dióxido de carbono y agua. Investigaciones sobre la oxidación química y biológica de desechos lácteos han demostrado que, por cada kilogramo de material orgánico, se

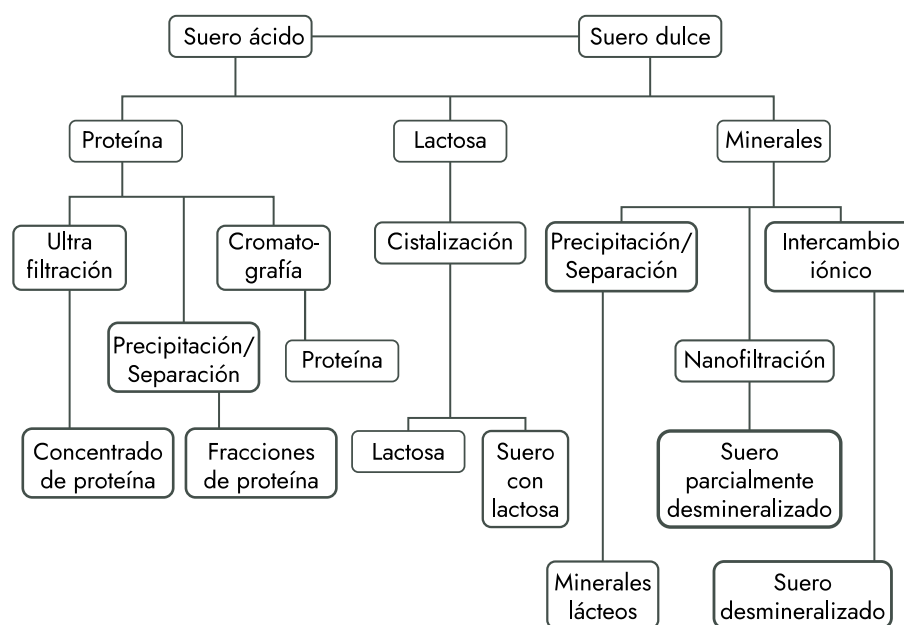
necesitan 1.2 kg de oxígeno para completar la oxidación (Webb y Johnson, 1991; Smit, 2003; Ramos *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2018). Esta situación, involucra a la sociedad y a las industrias lácteas, para buscar formas alternas de utilización del suero ya que es una gran fuente de nutrientes que ha sido desperdiciada por años y vertida en las aguas del mundo.

Desde siglos pasados el suero ha sido procesado para obtener productos de diferente naturaleza. Con el paso del tiempo, la preocupación social y el crecimiento en la investigación, ha aumentado el número de opciones de aprovechamiento; sin embargo, la implementación de las tecnologías de procesamiento es costosa y no todos los países tienen la capacidad económica para aplicarlas. Entre los procesos y productos que inicialmente se visualizaron para ser generados a partir del suero, están la cristalización de la lactosa, la deshidratación del suero para producir suero en polvo, la fermentación para generar etanol o metano, la hidrólisis de la lactosa para obtener glucosa y galactosa y también el cultivo de levaduras para producir proteína unicelular (Kessler, 1981; Bozanic *et al.*, 2014).

Veisseyre (1980) y Osorio-González *et al.* (2018) presentan un esquema del tratamiento del suero, partiendo de sus dos formas comunes, suero ácido y suero dulce, el cual se resume en la FIGURA 1, donde se puede apreciar la diversidad de productos posibles, algunos de ellos son diferentes y otros son semejantes a los mencionados previamente. Es un esquema bastante amplio y general, por todos los productos o compuesto que se pueden obtener.

Por otro lado, más recientemente, a finales del milenio anterior y en lo que va de este, se ha propuesto el desarrollo de bebidas a base de suero, alcohólicas, energéticas, fortificadas o funcionales, no alcohólicas, no carbonatadas, nutritivas y refrescantes, entre otras. También se han desarrollado víveres para alimentación animal. Con fundamento en todo lo mencionado, la siguiente sección describe productos obtenidos a partir del suero, el procesamiento utilizado en su elaboración, así como algunos trabajos de investigación relacionados a ellos (Pérez Marquez, 1998; Aguilar Ros, 2003; Vélez Ruiz, 2017).

Figura 1. Opciones para procesar el suero de quesería y los productos obtenidos (Veisseyre, 1980; Osorio-González *et al.*, 2018)



## 2. Productos Obtenidos a partir del Suero de Quesería

La utilidad del suero para generar una diversidad de productos, nutrientes o ingredientes es muy grande, la *TABLA 2*, muestra la aplicación de varios componentes del suero, así como sus beneficios (Poveda, 2013, Ramos *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2018).

Tabla 2. Usos de los componentes obtenidos del suero

| Aplicaciones                                                                                                | Beneficios                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Productos de panadería como croissants, tortas y otros                                                      | Incrementar el valor nutricional, como emulsificante. Reemplazar la adición de huevo, para dar cuerpo a la masa.                                      |
| Productos lácteos como bebidas fermentadas y quesos                                                         | Incrementar valor nutricional, emulsificante, gelificante. Mejorar propiedades organolépticas. Mejorar consistencia y cohesividad.                    |
| Bebidas, como jugos de fruta, refrescos, bebidas achocolatadas, bebidas a base de leche                     | Mejorar valor nutricional, solubilidad, viscosidad y estabilidad coloidal.                                                                            |
| Postres como yogur y helados                                                                                | Mejorar propiedades emulsificantes, dar cuerpo y textura a los productos.                                                                             |
| Confitería                                                                                                  | Como emulsificante y para facilitar el batido.                                                                                                        |
| Productos cárnicos                                                                                          | Pre emulsificante y gelificante. Mejorar solubilidad.                                                                                                 |
| Alimentos nutricionales, para deportistas, para adultos mayores, para infantes, alimentación hospitalaria   | Mejorar el valor nutricional y bajar costos. Aumentar el consumo de proteína. Aumentar propiedades funcionales.                                       |
| Concentrados de proteína, productos alimenticios especiales, suplementos nutricionales                      | Aumentar valor nutritivo. Incrementar contenido de proteínas.                                                                                         |
| Aislados de proteína y suplementos de aumentar el valor nutritivo. Proteína, bebidas y productos proteicos  | Aumentar el valor nutritivo. Incrementar.                                                                                                             |
| Purificación de proteínas aisladas. Compuesto transportador en productos farmacéuticos, fórmulas infantiles | Fuente de compuestos bioactivos, péptidos y proteínas con potencial antihipertensivo actividad antimicrobiana, antioxidante. Incrementar la saciedad. |
| Bioconversión de lactosa: alcohol, ácido láctico, biocombustible                                            | Facilidad de conversión y reacciones bioquímicas.                                                                                                     |
| Extracción de minerales                                                                                     | Fuente de calcio y fósforo, entre otros.                                                                                                              |

Poveda (2013), Ramos *et al.* (2016); Kumar *et al.* (2018).

### 2.1 Suero en Polvo

El suero en polvo se ha producido por muchos años, a partir de la concentración del suero, seguido del secado en tambor o por espreas. El polvo seco con alta proporción de lactosa amorfa anhidra (<70 %), se puede obtener por secado “spray” del concentrado para alcanzar 96 % de sólidos. El proceso de secado del suero ha sido modificado, debido a las propiedades higroscópicas y aglomerantes que infiere la lactosa como componente mayoritario y al grado de acidez. A partir de 100 kg de suero con 6 kg de sólidos, se obtienen los siguientes componentes, 88 kg de agua se evaporan durante la concentración, mientras que 6 kg más de agua se eliminan en el secado, dejando solo



0.25 kg de humedad residual en el producto en polvo (Kessler, 1981; Smit, 2003; Bozanic *et al.*, 2014; Ramos *et al.*, 2016; Vélez-Ruiz, 2017). Este subproducto del suero, es probablemente el más utilizado por la industria.

Debido a su composición (77.6 % de proteína, 53 %  $\beta$ -lactoglobulina, 18 %  $\alpha$ -lactoalbúmina y 5 % seroalbúmina) y sus excelentes propiedades gelificantes, el suero en polvo en solución ha sido utilizado para conducir estudios de ensuciamiento y formación de geles en equipos de transferencia de calor (a temperaturas menores de 100 °C) y de procesamiento en general. Utilizando este derivado del suero como material modelo se han desarrollado y propuesto, cinéticas de reacción y se ha observado que la disolución de los geles formados, son parte importante de los procesos de limpieza de los equipos industriales (Xun *et al.* 2002).

Suero de queso Cheddar en polvo desmineralizado y no desmineralizado fueron utilizados en la formulación de helado y yogur descremados, observando que decreció la sinéresis y la viscosidad aparente de ambos productos lácteos, también se registró un incremento en la fuerza de penetración en función del aumento de suero, igualmente el sabor y olor mejoraron en la mayoría de las muestras preparadas (Haque y Ji, 2003).

## 2.2 Producción de Lactosa

La obtención de este disacárido se inició en Europa a principios del siglo XX y posteriormente en otros continentes. Este compuesto se puede obtener por medio de diferentes operaciones, como evaporación, cristalización y filtración. En uno de los procesos comerciales, el suero es encalado, calentado y filtrado para remover las proteínas y el fosfato de calcio, que dificultan la etapa de cristalización posterior a la concentración del suero, pasa por una centrifugación, un lavado y secado como operaciones finales; con variantes tecnológicas, propias de la región y sobre todo del tipo de lactosa a producir,  $\alpha$  o  $\beta$  (Kessler, 1981; Webb y Johnson, 1991; Osorio-González *et al.*, 2018).

Para tener información de flujo, Morison y Mackey (2001), determinaron la viscosidad de soluciones de lactosa y de suero proteína, en función de la concentración (5-40 %) y la temperatura (10-50 °C), que pueden corresponder a las soluciones obtenidas por ósmosis inversa y ultrafiltración. La viscosidad de las soluciones de lactosa se registró en un rango de 0.62 a 3.74 mPa s, en función de los sólidos y la temperatura; mientras que para las soluciones de suero proteína varió entre 1.1 y 151 mPa s a 20 °C. Aquellas soluciones que incluyeron a ambos componentes, mostraron un comportamiento al flujo de carácter no newtoniano, con un índice de flujo menor a 1, es decir, de naturaleza reo-adelgazante.

Como una aportación práctica, Bhandari y Burel (2007) desarrollaron modelos lineales para determinar la fracción cristalina de lactosa presente en soluciones de lactosa y en suero, a partir de la medición de actividad de agua. Para la solución de lactosa la relación propuesta fue  $\Delta L = 1874.4 \Delta A_w$ , mientras que para el suero resultó  $\Delta L = 1155.2 \Delta A_w$ , donde  $\Delta L$  es la cantidad de cristales monohidratados de  $\alpha$ -lactosa (g/100 g de agua) en ambas mezclas y  $\Delta A_w$  se refiere a la diferencia en actividad de agua medida, antes y después de la cristalización.

La lactosa obtenida del suero, que presenta un bajo índice glicémico y calórico, puede tener diversas aplicaciones, como suplemento en fórmulas lácteas para bebés, en la producción de glucosa y galactosa por hidrólisis (Osorio-González *et al.*, 2018).

## 2.3 Proteínas del Suero

La proteína del suero es una de las proteínas de más alta calidad biológica, debido a que contiene aminoácidos de cadena ramificada y aminoácidos esenciales. Puede emplearse para el bienestar y la salud en los seres humanos (Korhonen y Pihlanto, 2003; Ramos *et al.*, 2016). No constituyen el componente más abundante, pero si es la parte más importante en los aspectos nutricional y económico. Representa una mezcla con un amplio rango de propiedades funcionales, siendo sus principales componentes la  $\beta$ -lactoglobulina y la  $\alpha$ -lactoalbúmina; además, incluye otras proteínas como lactoferrina, lacto peroxidasa, inmunoglobulinas, y glicomacropéptidos; son una fuente de aminoácidos esenciales como leucina, triptófano, lisina y aminoácidos azufrados (Parra, 2009; Bozanic *et al.*, 2014; Ramos *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2018).

Las proteínas del suero pueden obtenerse por dos variantes, ultrafiltración y precipitación por medio de calor. Su obtención comúnmente pasa por la eliminación de la grasa presente por centrifugación, para calentar posteriormente el suero desengrasado a 95-96 °C por 30 min, para desnaturalizar las proteínas, el pH se ajusta a ~ 4.5 con adición de ácido láctico para alcanzar el pH isoelectrico, así la proteína precipitada se separa y enfría constituyendo el concentrado proteico. Y cuando el concentrado no se emplea inmediatamente, se recomienda secarlo (Kessler, 1981; Smit, 2003; Vélez-Ruiz, 2017; Kumar *et al.*, 2018).

En un estudio, realizado para tratar de mejorar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del yogur, Modler *et al.* (1983) utilizaron diferentes proteínas. Los yogures preparados con concentrados de suero proteínas fueron superiores en apariencia y suavidad que aquellos yogures enriquecidos con caseína.

Resch y Daubert (2002) utilizaron tres concentrados de suero proteína comerciales para preparar geles de estos aislados, por un proceso de derivatización, consistente en la hidratación de la proteína, ajuste de pH, gelación térmica, liofilización y molienda. Se determinaron sus propiedades reológicas, tanto de las soluciones (0.01-6.0 Pa s, en función de la razón de corte) como de los geles, así como la capacidad de retención de agua (CRA). Y aunque la composición influyó la funcionalidad de los geles de los polvos finales, todas las muestras verificaron un importante incremento en su CRA y en su capacidad de espesamiento.

Las suero-proteínas, han sido utilizadas y estudiadas como componentes de películas protectoras y comestibles. Las propiedades de barrera al oxígeno en función de la composición y de la humedad relativa fueron estudiadas por Hong y Krochita (2003), con buenos resultados. Mientras que Cagri *et al.*, (2003) desarrollaron películas antimicrobianas con aislado de suero-proteína, que aplicaron en “hot dogs”, para inhibir el crecimiento de *Listeria monocytogenes*.

Herceg y Lelas (2005), condujeron un estudio para determinar el efecto de la temperatura y la concentración en las propiedades de flujo de concentrados de suero-proteína y leche descremada, sometidos a un proceso tribo-mecánico, donde encontraron que la viscosidad de los concentrados fue mayor en aquellos tratados mecánicamente en comparación con los que no recibieron el tratamiento; por otro lado, la viscosidad fue mayor en los concentrados a base de suero.

Existen varias tecnologías aplicadas para la recuperación de las proteínas del suero de leche, entre las que se encuentra la termocoagulación, proceso que utiliza agentes floculantes, filtración en gel, intercambio iónico y ultrafiltración. Este último se emplea actualmente en las industrias queseras, ya que

es un método sencillo para la separación y recuperación de las proteínas del suero, las ventajas de este método con respecto a los demás es que se pueden obtener las proteínas libres de impurezas, no existe modificación de las propiedades funcionales, ni desnaturalización de las proteínas (Clar *et al.*, 2003).

## 2.4 Minerales

Entre los minerales que se obtienen del suero, el calcio es uno de los más importantes. La utilización del suero como una alternativa para incrementar el contenido de calcio de mayor biodisponibilidad en los alimentos, es una de las opciones valiosas (Poveda, 2013).

## 2.5 Ácido Láctico, Fermentación Alcohólica y Anaerobia

El ácido láctico se emplea en las industrias alimenticia, cosmética, farmacéutica, química y textil. Recientemente se ha incorporado como materia prima en la generación de plástico biodegradable. Este ácido puede producirse, ya sea por vía fermentativa o por vía sintética y puede servir como sustituto de otros ácidos, cítrico o tartárico, para la producción de bebidas no alcohólicas, dulces y medicamentos, entre otros. La producción por fermentación microbiana es preferida por razones ambientales y escasez de recursos petroquímicos (Chandrajith y Karunasena, 2018).

Para lograr la obtención de diversos componentes del suero, por medio de la fermentación es conveniente realizar su fraccionamiento, con el fin de generar los compuestos que serán utilizados como sustrato. Así el fraccionamiento permite obtener suero desproteínizado, desmineralizado y rico en lactosa. Por ejemplo, la producción microbiológica de ácido láctico por *Lactobacillus bulgaricus* es de importancia industrial. Mientras que la generación de etanol por medio de levaduras del género *Torula*, es un proceso muy utilizado (Ramírez-Navas, 2012; Bozanic *et al.*, 2014).

## 2.6 Elaboración de bebidas

Desde los años 70's, se sugirió que el suero podía ser empleado en la formulación de refrescos o bebidas nutritivas, con alto contenido proteico, así como componentes de origen sérico en sopas y jugos de frutas (Holsinger *et al.*, 1974; Bozanic *et al.*, 2014). Los estudios y esfuerzos de laboratorio han continuado para incorporar al suero en bebidas para el consumo humano, especialmente con propósitos energéticos, nutritivos y terapéuticos.

Además de la producción de “cerveza”, que inicialmente se generó a partir de suero suplementado con malta, se han elaborado bebidas con diferentes características. A lo largo de los años se han formulado bebidas a partir del suero, que requieren de una tecnología relativamente sencilla y económica; que incluyen un tratamiento previo (deslactosado, desmineralización u otro) en función del tipo de bebida a preparar, además de un tratamiento térmico de pasteurización o esterilización y la deodorización para asegurar su inocuidad (Pérez, 1998; Vélez-Ruiz *et al.*, 1999).

En los últimos años se han observado tendencias mundiales, que indican un interés de los consumidores por ciertos alimentos que aporten beneficios al organismo y prevengan ciertas enfermedades. Estas variaciones en los patrones de alimentación provocaron la generación de una nueva área de desarrollo en la Ciencia de los Alimentos y de la Nutrición que corresponde al desarrollo de alimentos funcionales (EUFIC, 2007). Los alimentos funcionales son aquellos que contienen componentes

biológicamente activos que ofrecen beneficios para la salud y reducen los riesgos de sufrir enfermedades, lo que se ha intentado en algunas bebidas con suero. Tal fue el caso del trabajo de Hernández y Vélez Ruiz (2011) y Hernández Grajales (2015) quienes presentaron el desarrollo de una bebida funcional a base de suero, adicionada con inulina y microorganismos probióticos.

### 3. Desarrollo de Bebidas Refrescantes para Adultos a Base de Suero

Se llevó a cabo un estudio, con el objetivo de desarrollar una bebida saborizada a partir de suero, para lo cual se obtuvieron muestras de cuatro fuentes diferentes, para seleccionar una, que se almacenó en refrigeración a 5 °C, y con el suero seleccionado se formularon las bebidas, pensando en consumidores adultos (Pérez, 1998). De las cuatro muestras, la primera provino de una quesería en Cholula, la segunda fue obtenida de la elaboración de queso fresco en el laboratorio, la tercera fue proporcionada por una industria chipileña, mientras que la cuarta, fue proporcionada por Industrias Club de Tlaxcala.

#### 3.1 Bebida para Adultos, Metodología

El suero seleccionado fue estandarizado en sólidos solubles a 8, 10, 12 y 14 % (p/p) con sacarosa, fue ajustado a pH 3.0, 3.5 y 4.0 con ácido cítrico, para determinar el nivel de aceptación del color, sabor y aceptabilidad general por medio de pruebas sensoriales (escala hedónica de 9 puntos). A partir de éstos, se desarrollaron las formulaciones, con pH y dulzura aceptados sensorialmente, incorporando cuatros sabores, cereza, limón, naranja y piña. Las bebidas seleccionadas y analizadas fisicoquímicamente por medio de métodos analíticos estándares, fueron conservadas con ácido sórbico como conservador (0.06 % p/p). Un total de 99 muestras, fueron estudiadas durante su almacenamiento a 15, 25 y 35 °C, durante 37 días (Pérez, 1998).

#### 3.2 Resultados y Discusión, Bebida para Adultos

##### 3.2.1 Suero Utilizado, Tratamientos Aplicados y Suero Seleccionado

fue pasteurizada a 63 °C-30 min (1a), y a la segunda se le precipitaron las proteínas, sin previa pasteurización (1b). El segundo fue utilizado tal y como fue obtenido en el laboratorio, mientras que el tercero fue utilizado tal como fue proporcionado por la industria chipileña. En el caso del cuarto suero, se aplicaron 3 variantes, el primero sin ningún tratamiento (4a), al segundo se le precipitaron las proteínas (a pH de 4.5, por adición de ácido cítrico) y se le trató térmicamente a 90 °C-30 min (4b), mientras que al tercero se le aplicó una pasteurización tradicional a 63 °C-30 min (4c).

Se realizaron los análisis fisicoquímicos y microbiológicos en los cuatro sueros de quesería, del primero se prepararon 2 submuestras, una

Los valores determinados, de acidez estuvieron en un rango de 0.16 a 0.56 %, cenizas 0.22-0.76 %, grasa 0.07-0.58 %, lactosa 3.52-7.14 %, pH de 4.47 a 6.50, proteínas 0.23-0.69 % y sólidos solubles 5.77-16.38° Bx. Mientras que los conteos microbianos realizados, arrojaron rangos en cuentas estándar de 160 (suero 2) a 580000 UFC/mL (suero 1a) y de < 100 a 14 200 UFC/mL de hongos y levaduras.

Al analizar la composición, como se esperaba, el lote que mostró constancia en sus características fue el cuarto, por lo que se seleccionó el suero 4b como el apropiado para realizar las formulaciones mencionadas previamente, así como los análisis y las pruebas posteriores, tanto sensoriales como de estabilidad.

### **3.2.2 Pruebas Sensoriales, Sabor Seleccionado y Formulación Final**

Se prepararon las bebidas con 8, 10, 12 y 14°Bx y se llevaron a cabo pruebas sensoriales, para detectar el grado de dulzura mejor aceptado; des-

pués de las pruebas realizadas y los análisis estadísticos, se decidió utilizar la bebida con 12°Bx. Se seleccionaron 4 sabores cereza, limón, naranja y piña, para continuar la formulación de la bebida, y se realizó una evaluación previa del pH (3.0, 3.5, 4.0 y 4.5). Por las observaciones, pruebas sensoriales y estadísticas realizadas, en las que se determinaron color, olor, sabor y aceptabilidad general, se llegó a la conclusión de preparar los cuatro sabores con pH de 3.5 y 4.0.

Las medias de las pruebas sensoriales obtenidas en las cuatro bebidas, para el color fueron de 6.75 y 6.60 para el sabor cereza, 6.10 y 6.25 para el sabor limón, mientras que para el sabor naranja resultó de 7.08 y 7.16; siendo 6.60 y 6.65 para el sabor piña, correspondientes a los pH 3.5 y 4.0, respectivamente; existieron diferencias no importantes. Para la aceptación general 5.55 y 5.75 para cereza, 6.17 y 5.80 para limón, 6.35 y 6.65 para naranja, y 6.65 y 5.25 para piña, correspondientemente a ambos pH. Aunque las pruebas estadísticas no mostraron diferencia significativa entre los sabores y los dos pH, se tomaron en cuenta los comentarios proporcionados por los jueces, la apariencia general y una mayor conservación, por lo que se decidió el pH de 3.5. Los análisis posteriores de estabilidad se efectuaron con la bebida sabor limón con pH de 3.5, empleando la siguiente formulación: 21.78 mL de suero, 272.72 mL de agua, 279.69 g de sacarosa, 123 mL de saborizante, 40 mL de color limón al 1 %, 134 mL de ácido cítrico al 50 % (p/v) y 13.068 g de ácido sórbico (Pérez, 1998).

### **3.3 Pruebas y Análisis de Estabilidad, Bebida para Adultos**

Las pruebas de estabilidad con la bebida sabor limón, se llevaron a cabo a tres temperaturas, 15, 25 y 35 °C. En el almacenamiento, se obtuvieron las siguientes observaciones: la acidez se mantuvo constante hasta el día 26 para aumentar posteriormente, el color expresado por tres parámetros indicó que tanto la claridad como el grado de rojo (ah) decrecieron durante las 5 semanas, en contraste el tono amarillo (bh) aumentó, arrojando un incremento en el cambio neto de color como parámetro global. La humedad se mantuvo constante como se esperaba, y en contraste, la actividad de agua mostró cierta inestabilidad, el pH decreció en el décimo día y posteriormente incrementó el día 35, siendo mayor a 35 °C.

En cuanto a la evaluación sensorial, la apreciación promedio del color disminuyó durante el almacenamiento, de 6.7 a 5.9, de 6.7 a 5.8 y de 6.7 a 5.5, respectivamente a cada temperatura; el sabor tuvo la misma tendencia decreciente, 5.9 a 5.8, 5.9 a 5.4, 5.9 a 3.0, y fue más notable a 35 °C que a 25 y 15 °C; el olor tuvo cambios de 6.6, aumentó a 7.0 (15 °C), y decreció a 6.2 (25 °C) y a 6.4 (35 °C). La aceptabilidad general fue mejor para la bebida a 15 °C; la disminución fue de 6.4 a 5.8 a temperatura baja, de 6.4 a 5.3 para 25 °C y 6.4 a 5.1 para 35 °C. Observando una diferencia significativa entre 15 °C y las otras dos temperaturas, pero no entre 25 y 35 °C.

El conteo microbiológico mostró un aumento de 100 (día cero) a 30 000 UFC/mL de mesófilos aerobios en la quinta semana, mientras que el desarrollo de hongos y levaduras se mantuvo estable hasta la tercera semana.

### 3.4 Bebida para Adultos, Conclusión

Se desarrolló una bebida a base de suero que potencialmente puede ser producida para refrescar y nutrir complementariamente a consumidores adultos, con una vida de anaquel de tres semanas a temperatura de 15 °C. A mayores temperaturas la pérdida de atributos fisicoquímicos o de calidad y el crecimiento microbiano es significativa y aunque se seleccionó el sabor a limón, los otros tres sabores también podrían ser utilizados en la formulación de la bebida, ya que tuvieron aceptaciones equivalentes (Pérez, 1998).

## 4. Desarrollo de una de Bebida Nutritiva para Niños a Base de Suero

### 4.1 Bebida para Niños, Metodología

En este trabajo se decidió utilizar suero en polvo para la formulación de las bebidas; el suero fue caracterizado previamente a su incorporación, resultando con 60.2 % de lactosa, 11.1 % de proteína, 7.52 % de cenizas, 5.96 % de humedad y 2.22 % de ácido láctico. Mismo que se usó en tres concentraciones, 10 %, 12.5 % y 15 %, lo que aseguró un nivel de proteínas superior al 1 %, que se considera necesario para tener una bebida fortificada; se emplearon dos sabores, fresa (pulpa) y naranja (concentrado); también dos niveles de tixogum (mezcla comercial de gomas de acacia y de xantana, tiene la propiedad de mantener dispersas las partículas y evitar su sedimentación) fueron utilizados a concentraciones de 0.05 y 0.10 %. Para la formulación de la bebida, se tomaron en cuenta los niveles recomendados de nutrientes (INN, 1983; Aguilar, 2003). Y se adicionó benzoato de sodio como conservador en niveles de 0.05 y 0.10 %. De lo anterior, se formularon 24 bebidas empleando un diseño factorial 3 x 2 x 2 x 2, 3 niveles de suero, 2 de mezcla comercial tixogum, 2 de conservador y 2 sabores, inicialmente se incluyó maltol (como potenciador en un nivel del 0.03 %) en las bebidas. Estas muestras se almacenaron a temperatura ambiente durante 14 días (Aguilar, 2003).

### 4.2 Resultados y Observaciones de la Primera Etapa, Bebida para Niños

En la primera parte, los parámetros evaluados fueron acidez, grados Brix, color, densidad, humedad, actividad de agua, pH, sedimentación y viscosidad. También se realizó un análisis microbiológico para mesófilos, hongos y levaduras y evaluaciones sensoriales con niños.

La acidez de las bebidas, relacionada a la presencia de ácido láctico, aumentó como consecuencia del metabolismo microbiano. Se registraron valores de 0.579, 0.607 y 1.033 % (p/p) para la bebida de fresa con 12.5 % de suero; para la bebida sabor naranja con 10 % de suero fueron medidos niveles de 0.949, 0.949 y 0.961 % (p/p) el día 0, el día 7 y el día 14. Mientras que en las bebidas, de ambos sabores, con 15 % de suero, prácticamente no hubo incremento durante la primera semana y solo se registraron aumentos en la segunda, con valores de 1.12 %, 1.53 y 1.09 % de ácido, respectivamente,



Los sólidos solubles fueron 17.5, 20.0 y 22.5°Bx para la bebida de fresa, y de 24.0, 25.0 y 26.0 para la de naranja, relacionados al contenido de suero y al tipo de saborizante, que propiamente se mantuvieron constantes durante el almacenamiento. Lo mismo sucedió con la densidad, 1030-1070 kg/m<sup>3</sup> para la bebida de fresa y 1.09-1.13 kg/L para la bebida de naranja, que mostró muy pequeños cambios en el almacenamiento.

El pH de 4.5, fue ligeramente superior en el sabor fresa y para las bebidas con mayor contenido de suero; este parámetro prácticamente no mostró variación durante las dos semanas de almacenamiento, con 4.6-4.7 al final de la primera semana y un decremento en la segunda, bajando a 4.4, atribuido a la presencia de ácido láctico.

El color medido a través de los tres parámetros ah, bh y Lh, mostró variaciones para cada bebida. El parámetro ah en la bebida de fresa, varió de 11-13 al inicio, cambió a 10-11 con el almacenamiento, hubo disminución de color rojo; con relativa semejanza para la bebida de naranja que cambió de -6 a -6.5 para el día 0, y -5.3 a -5.8 al día 14, es decir hubo pérdida de color verde. Mientras que el parámetro bh varió de 3.5-4.0 a 2.3-2.5 por almacenamiento en la bebida de fresa; y de 14-16 a 9-12 para la de naranja, es decir hubo disminución de tonalidad amarilla. Ambos cambios en la tonalidad, rojizo y amarillento, se atribuyeron a cierta pérdida de vitaminas.

Los cambios más interesantes se dieron en la luminosidad, como lo muestran las figuras 2 y 3, donde por un lado se puede apreciar el efecto de la concentración de suero en la formulación (FIGURA 2), en que a mayor contenido de suero hubo mayor luminosidad.

Y, por otro lado, la influencia del tiempo de almacenamiento en la luminosidad (FIGURA 3), Lh aumentó de 33-37 a 37-40 en la bebida sabor fresa y de 39-42 a 42-47 en la bebida sabor naranja, situación que no es usual, pero para el producto es favorable.

En general hubo un efecto significativo del tiempo de almacenamiento sobre el color y así lo reflejó también el cambio neto del color.

Figura 2. Parámetro de luminosidad en las bebidas de fresa

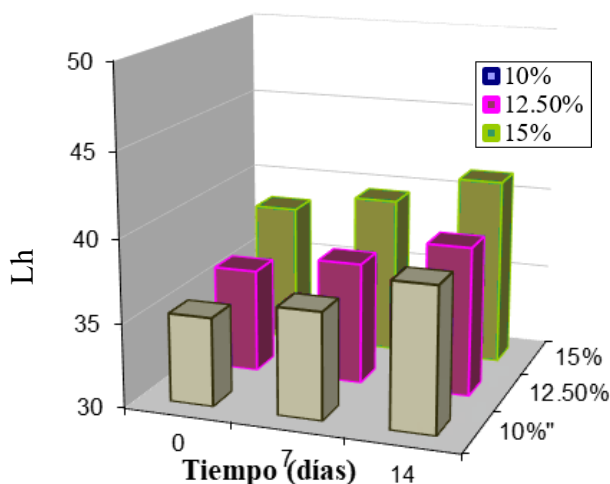
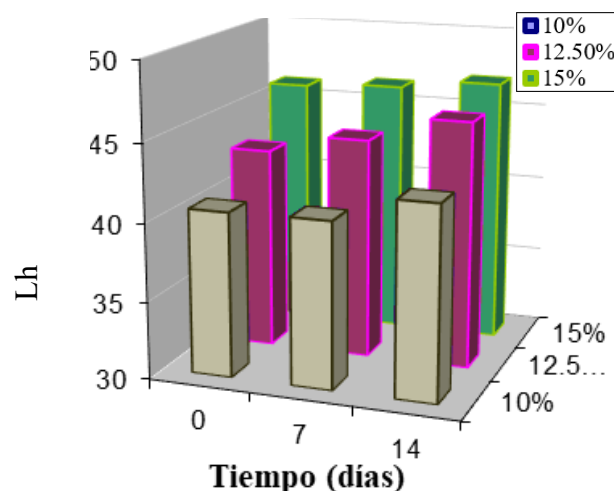


Figura 3. Parámetro de luminosidad en las bebidas de naranja



En cuanto a la humedad y la actividad de agua, ambos valores estuvieron ligados a la formulación y particularmente al contenido de suero; en la bebida de fresa se registraron humedades de 81.61, 79.26 y 76.91 % y en la bebida sabor naranja fueron 73.82, 71.41 y 69.11 % para 10.0, 12.5 y 15.0 % de suero. Este contenido de agua, así como la actividad de agua evaluada experimentalmente (0.983-0.989), que también fue calculada a partir de una ecuación teórica (Ross y Norrish), no mostraron variación durante el almacenamiento. Lo cual era de esperarse con envases herméticos y con cambios en la composición que fueron mínimos (Aguilar, 2003).

Otra de las propiedades medidas fue la viscosidad, cuyo incremento fue en función del contenido de suero y del tiempo de almacenamiento. La *TABLA 3* resume las determinaciones de esta propiedad de flujo, que está relacionada con un cierto grado de sedimentación observado desde el día 3, de los datos presentados se puede apreciar que la bebida de fresa tuvo más consistencia o viscosidad que la de naranja.

Tabla 3. Viscosidad (mPa s) de las bebidas de fresa y naranja en función de la formulación

| Bebida sabor | Goma ( %) | Concentración de suero |            |            | Día de almacenaje |
|--------------|-----------|------------------------|------------|------------|-------------------|
|              |           | 10.0 %                 | 12.5 %     | 15.0 %     |                   |
| Fresa        | 0.05      | 30.5 mPa s             | 44.2 mPa s | 47.7 mPa s | 0                 |
| Naranja      | 0.05      | 22.6                   | 30.5       | 32.8       | 0                 |
| Fresa        | 0.05      | 32.9                   | 50.2       | 58.2       | 7                 |
| Naranja      | 0.05      | 24.6                   | 35.8       | 33.2       | 7                 |
| Fresa        | 0.05      | 34.7                   | 72.5       |            | 14                |
| Naranja      | 0.05      | 29.0                   | 41.5       | 41.7       | 14                |
| Fresa        | 1.00      | 44.1                   | 54.2       | 59.0       | 0                 |
| Naranja      | 1.00      | 29.1                   | 36.5       | 41.2       | 0                 |
| Fresa        | 1.00      | 47.0                   | 62.8       | 67.3       | 7                 |
| Naranja      | 1.00      | 32.0                   | 39.7       | 42.1       | 7                 |
| Fresa        | 1.00      | 59.8                   | 84.3       |            | 14                |
| Naranja      | 1.00      | 35.9                   | 50.1       | 52.6       | 14                |

El conteo de microorganismos se realizó los días 0 y 7. Para el día 7, el conteo microbiológico, fue mayor a 1 000 sobre todo en el sabor fresa (9 de 12 sistemas) y solo 1 de 12 en el sabor naranja. Este valor superó el límite establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-130-SSA1-1995) la cual indica que, para una bebida pasteurizada, el límite para mesófilos aerobios es de 100 UFC/mL y para mohos y levaduras es de 25 UFC/mL. Sin embargo, esta norma es para jugos y néctares, sin perder de vista que la bebida preparada es pasteurizada, no es un jugo o un néctar.

La evaluación de la calidad sensorial se llevó a cabo mediante un panel de 15 jueces no entrenados de una escuela, formado por niños de 5 a 7 años de edad. Se evaluaron los 24 sistemas preparados

mediante una prueba con escala hedónica de 9 puntos. De acuerdo con las calificaciones promedio que se presentan en la *TABLA 4* y del análisis de varianza, se observó que, si bien hay aceptación en 4 bebidas de naranja, la mayoría de los jueces prefieren las bebidas de fresa, en 8 de 12 comparaciones, con valores promedio de 5.4-7.0.

Tabla 4. Calificaciones promedio obtenidas en la evaluación de sistemas de naranja y fresa

| Bebida sabor fresa | Calificación promedio | Bebida sabor naranja | Calificación promedio |
|--------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 1                  | 6.1                   | 1                    | 4.6                   |
| 2                  | 3.9                   | 2                    | 4.9                   |
| 3                  | 5.4                   | 3                    | 5.2                   |
| 4                  | 7.0                   | 4                    | 6.3                   |
| 5                  | 6.9                   | 5                    | 6.2                   |
| 6                  | 6.8                   | 6                    | 4.9                   |
| 7                  | 4.4                   | 7                    | 6.4                   |
| 8                  | 3.9                   | 8                    | 5.3                   |
| 9                  | 4.8                   | 9                    | 4.9                   |
| 10                 | 6.2                   | 10                   | 6.0                   |
| 11                 | 6.1                   | 11                   | 5.4                   |
| 12                 | 5.5                   | 12                   | 4.4                   |

### 4.3 Resultados y Observaciones de la Etapa de Almacenamiento de la Bebida para Niños

Tomando en cuenta, tanto los resultados de las determinaciones fisicoquímicas como la evaluación sensorial, se seleccionaron ambos sabores, fresa y naranja, con 15 % de suero y 0.1 % de conservador para el estudio de vida de anaquel a temperatura ambiente y en refrigeración (5 °C + 1).

De manera semejante a los resultados anteriores, se encontró que, a temperatura de refrigeración, no hubo cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas ya que las bajas temperaturas inhibieron el crecimiento microbiano, mismo que alcanzó 2 ciclos logarítmicos; resultando bebidas más estables, con una vida de anaquel de 15 días. Por otro lado, la vida de anaquel de las bebidas almacenadas a temperatura ambiente fue de aproximadamente 7 días debido a la producción de ácido láctico y de CO<sub>2</sub> provocando un mal sabor y olor en las bebidas. El crecimiento microbiano a temperatura ambiente fue de 7 ciclos logarítmicos.

Algunas de las determinaciones fueron las siguientes, pH: 4.8-5.2 el día 0, 4.5-4.8 el día 15; sólidos solubles: 21-24°Bx en fresa y 29-31°Bx en naranja; acidez: 0.6 y 1 % para fresa y naranja, constantes en refrigeración, 1 y 0.9-1.1 % para naranja y fresa después de 9 días a temperatura ambiente. El color prácticamente no cambió en sus 3 parámetros, por ejemplo, la luminosidad fue de 40 para fresa

y 46 para naranja y así permaneció los 15 días en refrigeración y 9 días a temperatura ambiente. La viscosidad básicamente fue estable, en un rango de 36 a 63 mPa s para ambas bebidas, durante 9 días a temperatura ambiente y 42-81 mPa s, durante 15 días a temperatura de refrigeración. En general, las bebidas sabor naranja fueron más estables que las bebidas sabor fresa.

La evaluación sensorial en esta parte no fue con niños, se realizó con adultos y mostró que las bebidas fueron aceptables, aunque identificaron un sabor salado y desagradable, generado durante el almacenamiento. Sin embargo, las calificaciones fueron satisfactorias. El resumen de las evaluaciones, así como las formulaciones, se presentan en la *TABLA 5*, las bebidas que obtuvieron mejor calificación fueron las siguientes: F6, N3, F12 y F3.

Aunque aparentemente el sabor fresa fue preferido, el análisis de varianza indicó que no fue significativamente diferente en la evaluación, así como ningún otro factor; los comentarios realizados por los jueces fueron en general, que las bebidas aún tenían cierto sabor salado (Aguilar, 2003).

Tabla 5. Medias de las evaluaciones sensoriales (escala hedónica) en las bebidas y sus formulaciones

| Bebidas y tiempo de evaluación |     | Media       | Suero | Goma   | Conservador |
|--------------------------------|-----|-------------|-------|--------|-------------|
| Primera evaluación             | F3  | <b>6.07</b> | 15%   | 0.10 % | 0.10 %      |
|                                | F6  | <b>6.40</b> | 15%   | 0.05 % | 0.10 %      |
|                                | N3  | <b>6.13</b> | 15%   | 0.10 % | 0.10 %      |
|                                | N6  | 6.00        | 15%   | 0.05 % | 0.10 %      |
| Segunda evaluación             | F9  | 5.67        | 15%   | 0.10 % | 0.05 %      |
|                                | F12 | <b>6.13</b> | 15%   | 0.10 % | 0.05 %      |
|                                | N9  | 5.13        | 15%   | 0.05 % | 0.05 %      |
|                                | N12 | 5.40        | 15%   | 0.05 % | 0.05 %      |

#### 4.4 Conclusión en la Elaboración de Bebida para Niños

Se elaboraron dos bebidas para niños a base de suero, sabor fresa y sabor naranja, que fueron elaboradas con 15 % de suero entre otros ingredientes. Ambas bebidas tuvieron una vida de anaquel de 7 días a temperatura ambiente y de 15 días en refrigeración, y mostraron buen grado de aceptación (mayor a 5.1), mejor evaluada por niños que por adultos, la bebida representa una buena opción de aprovechamiento del suero, que en este caso fue suero en polvo.

## 5. Comentarios Finales

En este capítulo de revisión, se presenta la información general sobre el suero y los productos o ingredientes que se han obtenido a partir de este desecho industrial; mismo que tiene varios componentes nutritivamente valiosos y representa una fuente de contaminación importante.

Se mencionan los principales productos obtenidos hasta el momento, como es el caso del suero en polvo, así como otras opciones novedosas que se están explorando, como es el caso de las películas comestibles. Se incluyen las formulaciones de bebidas, una para adultos y otra para niños, resaltando los aspectos más sobresalientes y los principales resultados obtenidos con estas bebidas, que representan una opción muy factible de aprovechamiento del suero.

El suero constituye un serio problema ambiental, afecta física y químicamente la estructura del suelo cuando se desecha como efluente, arrojado en el mar reduce la vida acuática pues agota el oxígeno disuelto, para evitar esos perjuicios, debe ser reciclado y aprovechado por el ser humano.

Es necesario y conveniente buscar su aprovechamiento. Existen posibilidades de beneficiarnos del suero, aunque los costos involucrados son considerables y deben bajar para hacerlos accesibles a las poblaciones de escasos recursos. La elaboración de bebidas con suero, constituye una buena opción.

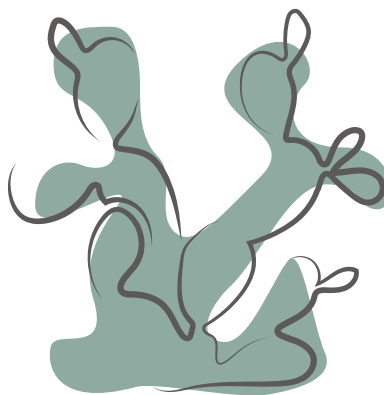
**Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## 6. Referencias

- Aguilar Ross I.D. (2003). *Elaboración de una bebida para niños fortificada con suero en polvo. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos. Universidad de las Américas Puebla. México.*
- Bhandari, B. y Burel, B. (2007). *Prediction of lactose crystals present in supersaturated lactose and whey solutions by measuring the water activity. International Journal of Food Properties, 10, 163-171.*
- Bozanic, R., Barukcic, I., Lizak, K. y Tratnik L. (2014). *Possibilities of whey utilization. Austin Journal of Nutrition and Food Sciences, 2 (7), 1-7.*
- Cagri, A., Ustunol, W., Osburn, W. y Ryser, E.T. (2003). *Inhibition of Listeria monocytogenes on hot dogs using antimicrobial whey protein-based edible coatings. Journal of Food Science, 68 (1), 291-299.*
- Chandrajith, V.G.G. y Karunasena, G.A.D.V. (2018). *Applications of whey as a valuable ingredient in Food Industry. Journal of Dairy and Veterinary Sciences, 6 (5), 001-004*
- Clar, D.A., Catignani, G.L. y Swaisgood, H.E. (2003). *Biodefense properties of milk: the role of antimicrobial proteins and peptides. Current Pharmaceutical Design, 9(16), 1239-1255.*
- EUFIC. (2007). *Consejo Europeo de Información Nacional sobre la Alimentación. Disponible en: www.eufic.org/page/es/page/FARCHIVE/. Accedido: 8 septiembre 2009.*
- FAO. (2017). *Publicaciones de la FAO. Catálogo 2017. Disponible en www.fao.org/3/b-i6407s.pdf. Accedido: 23 octubre 2020.*
- Haque, Z.U. y Ji, T. (2003). *Cheddar whey processing and source: II. Effect of non-fat ice cream and yoghurt. International Journal of Food Science and Technology, 38, 463-473.*
- Herceg, Z. y Lelas, V. (2005). *The influence of temperature and solid matter content on the viscosity of whey protein concentrates and skim milk powder before and after tribo-mechanical treatment. Journal of Food Engineering, 66 (4), 433-438.*
- Hernández-Grajales, T.C. (2015). *Obtención de una bebida funcional a base de suero de leche. Tesis de Maestría en Ciencia de Alimentos. Universidad de las Américas Puebla. México.*
- Hernández-Grajales, T.C. y Vélez-Ruiz, J.F. (2011). *Desarrollo de una bebida funcional a bases de suero de leche. XXXII Encuentro Nacional y Primer Congreso Internacional de AMIDIQ. Quintana Roo, México. 3-6 de Mayo.*
- Holsinger, V.H., Posati, L.P., DeVilbiss, E.D. (1974). *Whey beverages: A review. Journal of Dairy Science, 57 (8), 849-859.*
- Hong, S.I. y Krochita, J.M. (2003). *Oxygen barrier properties of whey protein isolate coatings on polypropylene films. Journal of Food Science, 68 (1), 224-228.*
- I.N.N. (1983). *Instituto Nacional de Nutrición. Ingestión Diaria Recomendada de Energía, Proteína, Vitaminas*

y Minerales para la Población Mexicana. Tablas de uso práctico. 9a. edición. Pag. 5. Instituto Nacional de Nutrición, Salvador Zubirán. D.F. México.

- Kessler, H.G. (1981). Food engineering and dairy technology. VERLAG KESSLER, Alemania.
- Korhonen, H. y Pihlanto, A. (2003). Food derived bioactive peptides opportunities from designing future foods. *Current Pharmaceutical*, 9(16), 1297-1308.
- Kosikowski, F. (1979). Whey utilization and whey products. *Journal of Dairy Science*, 62 (7), 1149-1160.
- Kosikowski, F. (1982). Cheese and fermented milk foods. F.V. Kosikowski and Associates Brooktondale, Nueva York.
- Kumar, R., Kumari, S., Shinde, G., Subramanian, V. y Nandanabapathi, S. (2018). Whey proteins: A potential ingredient for food industry- A review. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 37 (4), 283-290.
- Modler, H.W., Larmond, M.E., Lin, C.S., Froehlich, D. y Emmons, D.B. (1983). Physical and sensory properties of yogurt stabilized with milk proteins. *Journal of Dairy Science*, 66 (3), 422-429.
- Morison, K.R. y Mackey, F.N. (2001). Viscosity of lactose and whey protein solutions. *International Journal of Food Properties*, 4 (3), 441-454.
- Norma Oficial Mexicana. (1994). NOM-086-SSA1-1994. Bienes y Servicios. Alimentos y Bebidas no Alcohólicas con Modificaciones en su Composición. Secretaría de Salud, D.F., México.
- Norma Oficial Mexicana. (1995). NOM—130-SSA1-1995. Bienes y Servicios. Alimentos Envasados en Recipientes de Cierre Hermético y Sometidos a Tratamiento Térmico. Disposiciones y Especificaciones Sanitarias. Secretaría de Salud, D.F., México.
- Osorio-González, C.S., Sandoval-Salas, F., Hernández-Rosas, F., Hidalgo-Contreras, J.V., Gómez-Merino, F.C. y Ávalos de la Cruz, D.A. (2018). Potencial de aprovechamiento del suero de queso en México. *Agroproductividad*, 11 (2), 101-105.
- Parra Huertas, R.A. (2009). Lactosuero: importancia en la industria de alimentos. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía*, 62 (1), 4967-4982.
- Pérez Márquez M.O. (1998). Utilización de suero de quesería para la elaboración de una bebida refrescante. Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos. Universidad de las Américas Puebla. México.
- Poveda, E. (2013). Suero lácteo, generalidades y potencial uso como fuente de calcio de alta disponibilidad. *Revista Chilena de Nutrición*, 40 (4), 397-403.
- Ramírez-Navas, J.S. (2012). Aprovechamiento industrial de lactosuero mediante procesos fermentativos. *Revista Publicaciones e Investigación*, 6, 69-83.
- Ramos, O.L. Pereira, R.N., Rodrigues, R.M., Teixeira, J.A. Vicente, A.A. (2016). Whey and whey powders: Production and uses. *The Encyclopedia of Food and Health*, 5, 409-505.
- Resch, J.J. y Daubert, C.R. (2002). Rheological and physicochemical properties of derivatized whey protein concentrate powders. *International Journal of Food Properties*, 5 (2), 419-434.
- Smit, G. (2003). Dairy processing. Improving quality. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Spreer, E. (1991). Lactología industrial. Editorial Acribia. Zaragoza, España.
- Veisseyre, R. (1980). Lactología técnica. Editorial Acribia. Zaragoza, España.
- Vélez-Ruiz, J.F. (2017). Notas del curso de Tecnología de Productos Lácteos. Inéditos. Universidad de las Américas Puebla, México.
- Vélez-Ruiz J.F., Guerrero J.A. Pérez O. y Cuellar C. (1999). Elaboración de una bebida refrescante a base de suero lácteo. XX Encuentro Nacional de AMIDIQ. Pto. Vallarta, Jal., México. 11-14 de Mayo.
- Xun, H., Chen, X.D. y Ozan, N. (2002). Whey protein-based gel as a model material for studying initial cleaning mechanisms of milk fouling. *Journal of Food Science*, 67 (7), 2702-2711.
- Webb, B.H. y Johnson, A.H. (1991). Fundamentals of dairy chemistry. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut, EU.





# Estrategias tecnológicas para diversificar productos a partir de Jugo de agave: Fracciones de fructanos

Aldrete-Herrera, Pamela Isabel<sup>1</sup>

Medina-Torres, Luis<sup>2</sup>

Ceja-Medina, Isaacs<sup>1</sup>

Jiménez-Fernández, Maribel<sup>3</sup>

Montalvo-González, Efigenia<sup>1</sup>

López, Mercedes Guadalupe<sup>4</sup>

Ortiz-Basurto, Rosa Isela<sup>1\*</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos. TecNM-Instituto Tecnológico de Tepic. Av. Tecnológico #2595, Col. Lagos del Country, C.P. 63175, Tepic, Nayarit, México.

<sup>(2)</sup> Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Coyoacán, Cd. Universitaria, C.P. 04510 Ciudad de México, México.

<sup>(3)</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana. Av. Dr. Luis Castelazo, Industrial las Ánimas, C.P. 91190 Xalapa, Veracruz, México.

<sup>(4)</sup> Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Km. 9.6 Libramiento Norte Carretera Irapuato. León, 36821 Irapuato, Guanajuato, México.

\* Correspondencia

RIOB, <https://orcid.org/0000-0002-8284-4690>, riobasurt@ittec.edu.mx; Tel. 3112241882

La diversificación de productos, promueve el mayor aprovechamiento de cultivos y con ello, la implementación de la economía circular. Los fructanos nativos de agave han captado el interés industrial por su efecto prebiótico y tecnológico. Sin embargo, la presencia de alta concentración de azúcares simples y fructooligosacáridos (FOS) les confiere alta higroscopicidad, lo cual limita sus aplicaciones tecnológicas. A fin de lograr mayor estabilidad, se realizó la separación de tres fracciones de fructanos: enriquecidas en alto, intermedio y bajo grado de polimerización aparente (GPa), usando un tanque agitado con membranas de ultrafiltración de 10, 5 y 1 kDa en proceso escalonado. Se establecieron estrategias para la diversificación de fracciones con características específicas y se optimizaron las condiciones a nivel piloto. Las condiciones óptimas de operación establecidas en filtración tangencial son 3 bar, 25 °C y 3 L/min con una colmatación menor al 40 %. La dispersión del GPa fue determinada por HPAEC-PAD. Las fracciones enriquecidas con alto e intermedio GPa fueron estabilizadas en un secador por aspersión a condiciones de 110 °C  $T_{\text{entrada}}$  y 90 °C  $T_{\text{salida}}$ , 27500 rpm y un flujo de alimentación de 1.5 L/h-1 obteniendo un rendimiento mayor al 90 %. Por su alto contenido de fructosa, la fracción de bajo grado de polimerización fue concentrada a 72 °Brix en un rotavapor. Las fracciones enriquecidas con alto e intermedio GPa mostraron una solubilidad mayor al 95 % y baja viscosidad ( $\approx 1$  cps), sin embargo, su estabilidad térmica incrementó en relación al grado de polimerización. El análisis de infrarrojo mostró las bandas características de los carbohidratos, con diferencias en los picos de estiramiento de compuestos C-C y C-H relacionados con el contenido de mono y disacáridos presentes en las muestras. Las características de

cada fracción permiten diversificar su uso como aditivos prebióticos, estabilizantes y material de pared en formulaciones de la industria de alimentos.

**Palabras clave:** Fructanos de agave; filtración tangencial; estabilidad térmica; grados de polimerización; ultrafiltración.

## Introducción

Los fructanos de agave son una mezcla compleja de estructuras con glucosa terminal y enlaces  $\beta(2 \rightarrow 1)$  conocidos como inulinas,  $\beta(2 \rightarrow 6)$  levanos o una mezcla de ambos tipos de enlaces, conocidos como graminanos, destacan entre ellos la abundancia de agavinas que en comparación a los graminanos, contienen además glucosa intermedia (Mellado-Mojica, González de la Vara, y López, 2017). En el enfoque nutrimental son considerados fibra soluble con efecto prebiótico que favorece el crecimiento de diversas especies de probióticos (García-Gamboa *et al.*, 2020; García *et al.*, 2018; Sáyago-Ayerdi *et al.*, 2020; Zamora-Gasga *et al.*, 2015). Por otra parte, con

el fin de mejorar las propiedades sensoriales de los alimentos, se han incorporado en la formulación de matrices alimentarias (Jardines *et al.*, 2020; Jimenez-Sánchez *et al.*, 2020; Miramontes-Corona *et al.*, 2020; Santiago-García *et al.*, 2017; Zamora-Gasga *et al.*, 2014). En la mayoría de los casos, se han utilizado fructanos nativos de agave, los cuales debido a su alto contenido de fructosa son hidrofílicos, por lo que dificultan su incorporación en alimentos que requieren mantener baja  $a_w$  para mantener su estabilidad. Se han buscado alternativas para reducir su hidrofiliidad y mejorar sus propiedades, como la síntesis de fructanos a partir de enzimas aisladas (Beine *et al.*, 2008; Zhan *et al.*, 2018), sin embargo, este tipo de procesos resulta costoso a escala industrial, debido a ello se han buscado alternativas de menor costo, que no modifiquen las características de los fructanos de agave.

Una de estas tecnologías es el proceso de filtración con membrana, que permite clarificar, separar y/o concentrar productos sin el uso de solventes químicos ni altas temperaturas, además, este tipo de procesos permite el uso de todos los subproductos por lo que el aprovechamiento es integral y con ello, se promueve la inclusión de la economía circular. Actualmente se ha utilizado la filtración con membranas para la clarificación y estandarización microbiológica de jugos vegetales y de frutas, separación de compuestos biológicos de interés o de importancia industrial, entre otros (Ceja-Medina *et al.*, 2020a; Ding *et al.*, 2002; Sri Abirami Saraswathi *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2013).

Los fructanos de agave han mostrado grandes beneficios tanto tecnológicos como nutricionales, sin embargo, el campo estudiado es muy estrecho, por lo que varias especies de agave, incluso la variedad *Agave tequilana* (mayormente conocida), no está siendo aprovechada de manera integral. La tecnología de filtración con membranas ofrece una alternativa no solo para las especies con denominación de origen (DOT), el proceso es extrapolable a las demás especies de agave, permitiendo que los productos obtenidos sean aprovechados en su totalidad, como productos puros o mezclados, logrando una diversificación comercial. Por otra parte, la tecnología de membranas ofrece la alternativa para la obtención de nuevos productos y subproductos procedentes de diversas fuentes que generarán un aprovechamiento integral, además de un impacto benéfico que fortalece la implementación de la economía circular.

El objetivo de este estudio fue separar fracciones de fructanos en alto, medio y bajo grado de polimerización aparente, a partir de fructanos nativos de agave; además de caracterizarlos midiendo parámetros fisicoquímicos.

## 2. Materiales y métodos

### 1.1 Materia prima

Se utilizaron fructanos nativos de agave en polvo donados por la empresa Bestground SA de CV (Jalisco, México). Los fructanos en polvo fueron resuspendidos en agua destilada para formar una solución a 20 °Brix.

### 1.2 Equipo de ultrafiltración y condiciones de proceso

El proceso de ultrafiltración se realizó en dos etapas: En la primera se utilizó un sistema de filtración tipo tanque agitado escala laboratorio con capacidad de 500 mL, se usaron membranas planas de celulosa regenerada (Millipore®, MA, USA), con peso molecular de corte (MWCO por sus siglas en inglés) de 10 (PLCGC) 5 (PLCCC), 3 (PLBC) y 1 kDa (PLAC) en condiciones promedio de operación consideradas en: 2 bar, 300 rpm y 25 °C. La finalidad de esta etapa, consistió en seleccionar las membranas de interés para la separación de fracciones de fructanos en relación a su eficiencia de separación.

En la segunda etapa se realizó la obtención de fructanos de agave, para lo cual se utilizó un sistema de filtración tangencial de acero inoxidable escala piloto industrial con capacidad de 25 L, equipado con una bomba de desplazamiento positivo Prominent GMBH (SIGMA, USA) y un baño recirculador VWR (Polyscience, USA). Se utilizaron módulos de membranas con 0.5m<sup>2</sup> de superficie de filtración, de celulosa regenerada Pellicon (Millipore®, MA, USA) con MWCO 10 (PLCGC) 5 (PLCCC) y 1 kDa (PLAC).

#### 1.2.1 Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial 3x3 completamente al azar (*TABLA 1*), donde los factores fueron temperatura, presión y flujo de recirculación a tres niveles cada uno, establecidos de acuerdo a las características mecánica y térmica de la membrana y la estabilidad de la muestra.

Tabla 1. Diseño factorial experimental 3x3

| Factores                       | Niveles |    |    |
|--------------------------------|---------|----|----|
| Presión (Bar)                  | 1.5     | 2  | 3  |
| Flujo de recirculación (L/min) | 3       | 4  | 5  |
| Temperatura (°C)               | 20      | 25 | 30 |

El flux (L/h·m<sup>2</sup>) y el porcentaje de colmatación, fueron evaluados como variables de respuesta para determinar las condiciones de proceso.

### 1.3 Análisis fisicoquímicos

La caracterización fisicoquímica se llevó a cabo mediante la determinación de pH (método 920.43), Sólidos solubles totales (°Brix) (método 967.21) y humedad (método 964.22) siguiendo la metodología descrita por la AOAC (1990).

#### 1.4 Determinación de Azúcares reductores directos (ARD) y Azúcares totales

La determinación de ARD de las fracciones enriquecidas de fructanos de agave obtenidas en la separación por membranas se realizó con el método DNS (Miller, 1959), la concentración de azúcares totales fue realizados siguiendo el método Fenol-sulfúrico (Dubois, 1956) y corroborado mediante el kit Fructan HK (Megazyme, Bray, IE).

#### 1.5 Dispersión del grado de polimerización por HPAEC-PAD

El grado de polimerización (GP) de las fracciones de fructanos de agave, se determinó con base en la comparación del tiempo de elución de un estándar de inulina de achicoria (I2255, Sigma Aldrich, MO, USA) reportado por Aldrete-Herrera *et al.* (2019). Se usó un cromatógrafo de intercambio aniónico de alta resolución, acoplado a un detector de pulso amperométrico (HPAEC-PAD) ICS-5000 (DIONEX- Thermoscientific, MA, USA), provisto de una columna Carbopac PA-100 (45 mm x 250 mm) y una precolumna PA-100 (45 x 50 mm). Para la determinación de carbohidratos, se utilizó un gradiente escalonado de 90 min con NaOH 100 mM y CH<sub>3</sub>COONa 600 mM-NaOH 100 mM a 35 °C. Las fracciones de fructanos de agave, así como los estándares para determinar el Grado de Polimerización aparente (GPa) fueron preparados a una concentración de 2 mg/mL utilizando agua Mili-Q ( $\mu\text{s} = 1.25$ ), posteriormente centrifugadas (10 000 rpm, 10 min, 10°C) y filtradas a través de una membrana de nylon de 0.45  $\mu\text{m}$  (Millipore®, MA, USA) previo a su inyección. Los perfiles de dispersión fueron comparados con un estándar de inulina de achicoria (I 2255, Sigma Aldrich, MO, USA) y estándares de glucosa, fructosa, sacarosa, kestosa y nistosa (Sigma Aldrich, MO, USA) para determinar el GPa de cada fracción de fructanos de agave. Los resultados obtenidos fueron reportados en NC vs. min (Aldrete-Herrera *et al.*, 2019; Ortiz-Basurto *et al.*, 2008).

#### 1.6 Secado por aspersión

La deshidratación de las fracciones de intermedio y alto grado de polimerización se realizó en un secador por aspersión de disco rotatorio modelo LPG5 (Cima industries, China) (Capacidad evaporación de agua: de 5 L/h, diámetro disco atomizador: 5 cm, volumen cámara de secado: 1200 L, ciclón recolector: 85 cm altura, 35 cm diámetro), con las siguientes condiciones de operación: Temperatura de entrada ( $T_e$ ): 110 °C; Temperatura de salida ( $T_s$ ):90 °C; flujo de alimentación; 1.5 L/h, Velocidad disco atomizador: 27 500 rpm (Ceja-Medina *et al.*, 2020b).

#### 1.7 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La morfología de las fracciones de fructanos de agave se observó usando un escáner de microscopía electrónica (SEM) modelo LEO1450VP (Zeiss, Alemania). Las muestras fueron colocadas en una placa de metal y recubiertas de oro para obtener las micrografías de superficie. Las muestras se observaron con incremento de 50, 100 y 200x (Rodríguez-Furlan *et al.*, 2014).

## 1.8 Termogravimetría de fracciones de fructanos de agave

Los análisis termogravimétricos se llevaron a cabo en un TGA 55 (TA, Instruments, DE, USA). 6 mg de fructanos de agave en polvo fueron calentadas de 25 a 600 °C con calentamiento de 10 °C / min en una atmósfera de nitrógeno. La derivada de la pérdida de masa con respecto a la temperatura (TGA) fue calculada con el software TRIOS V4.4.0.

## 1.9 Análisis estadísticos

Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) de una sola vía utilizando el paquete STATISTICA versión 12 (StatSoft. Inc. 1984-2014, Tulsa, OK, USA). Se aplicó la prueba LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95 % para comparación de medias entre las muestras. El análisis de la superficie de respuesta se llevó a cabo usando STATGRAPHICS Centurion Software. Los experimentos se realizaron por triplicado y los resultados fueron expresados con la media  $N=3 \pm$  desviaciones estándar (SD).

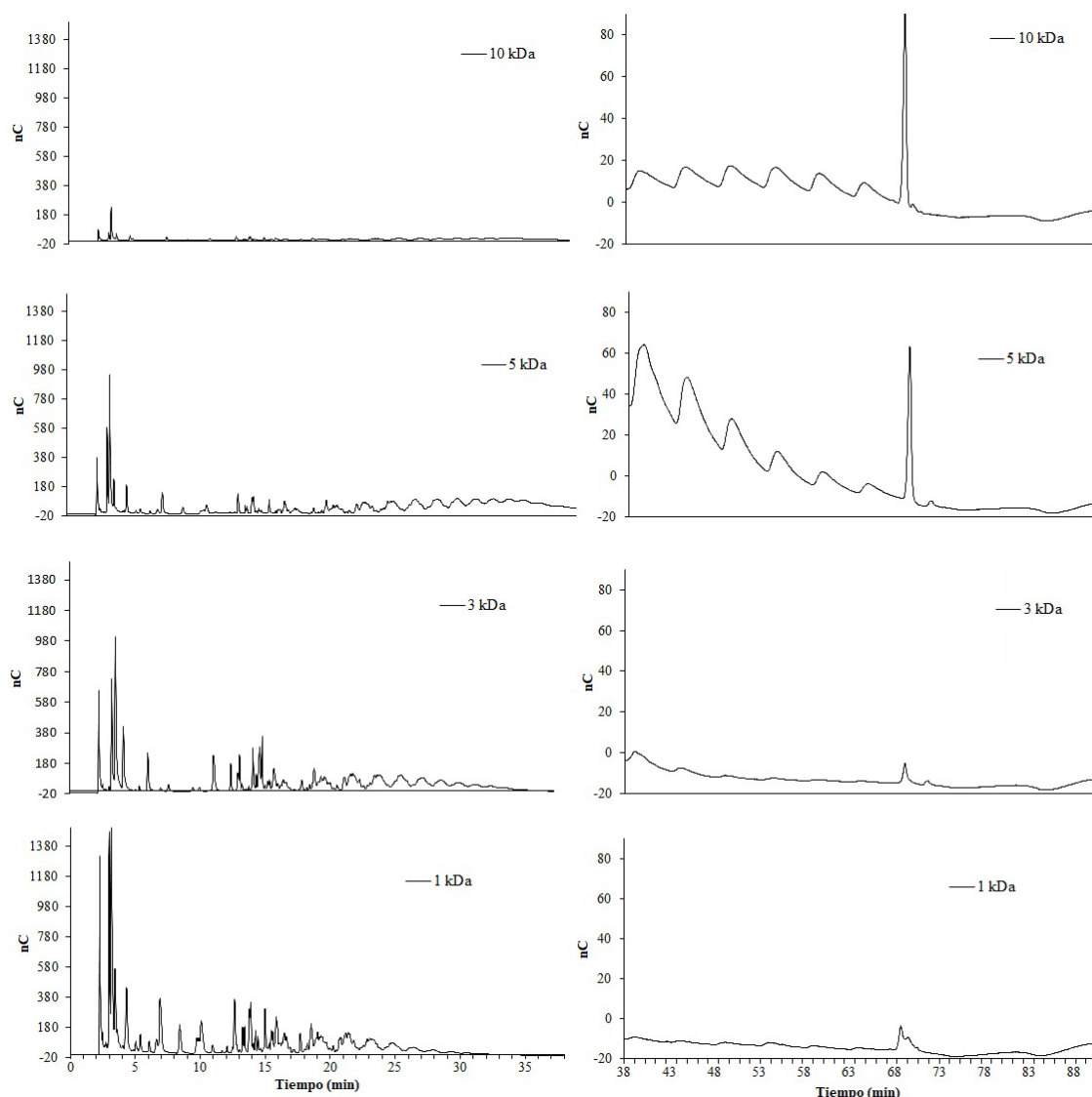
# 2. Resultados y discusión

## 2.1 Selección de membranas de ultrafiltración

Las membranas según su MWCO, mostraron resultados favorables respecto a la separación de fracciones de fructanos (*FIGURA 1*), se observó que la membrana de 10 kDa retiene fructanos de intermedio y alto grado de polimerización (GP 14 a GP > 60) con presencia de glucosa y fructosa en menor proporción. La membrana de 5 kDa mostró una concentración en fructanos con intermedio grado de polimerización (GP 5-30 principalmente) con presencia de fructanos de alto grado de polimerización, además de glucosa y fructosa, mientras que la membrana de 3 kDa mostró retención de fructanos de bajo e intermedio grado de polimerización ( $GP \leq 30$ ); y finalmente, la membrana de 1 kDa mostró mayor retención de fructanos de bajo grado de polimerización ( $GP \leq 6$ ). La presencia de fructanos de diferentes grados de polimerización en las fracciones obtenidas se debe a la estructura ramificada de los fructanos de agave, la variabilidad estructural que presentan, favorece entrecruzamientos entre ellas, por lo que, estructuras de menor o mayor grado de polimerización a la deseada, o bien, estructuras lineales puedan ser atrapadas entre las estructuras de interés, así también, éstas pueden ser arrastradas a través de la membrana de filtración llegando al permeado, por lo anterior descrito, es importante realizar una diafiltración (enjuague con agua) para asegurar una mayor purificación de las fracciones, hasta el grado de pureza deseado, logrando en cada etapa, la reducción de moléculas de menor tamaño.

El sistema de filtración tipo tanque agitado provisto con membranas planas, mostró capacidad para la separación de fracciones de fructanos de agave enriquecidos con diferentes grados de polimerización. Con base a los perfiles de las fracciones de fructanos obtenidas (*FIGURA 1*), se seleccionaron las membranas de 1, 5 y 10 kDa que separaron con mayor eficiencia las fracciones enriquecidas de bajo, intermedio y alto grado de polimerización aparente, para el escalamiento a un equipo de filtración tangencial nivel piloto industrial.

Figura 1. Distribución del GP de las fracciones de fructanos de agave obtenidas en el proceso de filtración con membranas



## 2.2 Determinación de las condiciones de proceso en un sistema de UF tangencial

Las condiciones de operación fueron evaluadas en la membrana de 10 kDa (*TABLA 2*). Los mayores valores de flux obtenidos en la membrana de 10 kDa fueron a 3 bar de presión, 20 °C y 5 L/min y 2 bar de presión 20 °C y 4 L/min, con una colmatación de  $37.7 \pm 5$  y  $38.1 \pm 7$  respectivamente a diferencia de la prueba 9 (3 bar de presión 30 °C y 4 L/min) que presentó menor permeabilidad, esto pudo ser ocasionado debido a las altas temperaturas que favorecieron el paso de la solución a través de la membrana provocando que partículas de mayor tamaño se depositen en la superficie o bloqueen los poros internos, por un efecto de polarización lo que consecuentemente reduce la permeabilidad en el proceso de filtración. Las condiciones de proceso se obtuvieron mediante un análisis de superficie de respuesta (*FIGURA 2*). La predicción del modelo para el flux se presenta en la *ECUACIÓN 1*.



**Ecuación 1**

$$\text{Flux} = -489.875 + 128.205 \cdot \text{Presión} + 12.9583 \cdot \text{Temperatura} + 243.833 \cdot \text{FA} + 2.62879 \cdot \text{Presión} \cdot \text{Temperatura} - 35.6894 \cdot \text{Presión} \cdot \text{FA} - 7.125 \cdot \text{Temperatura} \cdot \text{FA}$$

Las condiciones de operación para el proceso de ultrafiltración son 3 bar de presión, 3 L/min y 25 °C. Las cuales permitieron la separación de fracciones de fructanos de agave con diferente grado de polimerización, en las membranas de 10, 5 y 1 kDa, en todos los casos el factor de reducción volumétrico (FRV) fue igual 2, en un proceso de filtración (modalidad cerrado o Batch) el FRV juega un papel importante respecto a la integridad de la membrana, cuando se tiene un FRV =1, la permeabilidad en el sistema debe mantenerse estable y conforme el FRV va en aumento, es recomendable que la colmatación en la membrana no supere el 70 %. En los tres procesos de separación se obtuvo al final de la operación, una recuperación de la permeabilidad de la membrana superior al 90 %, lo que significa que la colmatación generada al aplicar las diferentes condiciones de proceso, fue del tipo reversible, por efecto de la concentración de sólidos, los cuales, al ser diluidos, permitieron la recuperación de la permeabilidad inicial.

En un proceso de filtración es importante mantener un equilibrio entre la presión transmembrana ejercida, el flujo de alimentación o flujo de recirculación de la solución y la temperatura. Si bien este último parámetro favorece el paso de solución a través de la membrana, debido a que a mayor temperatura disminuye la viscosidad, debe considerarse la naturaleza del producto y afinidad de componentes en la superficie de filtración, ya que puede generar interacciones que modifiquen la hidrodinámica en el sistema. La adecuada selección de las condiciones de operación mejora la eficiencia del proceso de ultrafiltración disminuyendo costos (Ben Hassan *et al.*, 2013). Además disminuye la colmatación en la membrana durante el proceso, que se presenta debido a la presencia de materia orgánica o la deposición de moléculas de mayor tamaño sobre los poros de la membrana (Sun *et al.*, 2013).

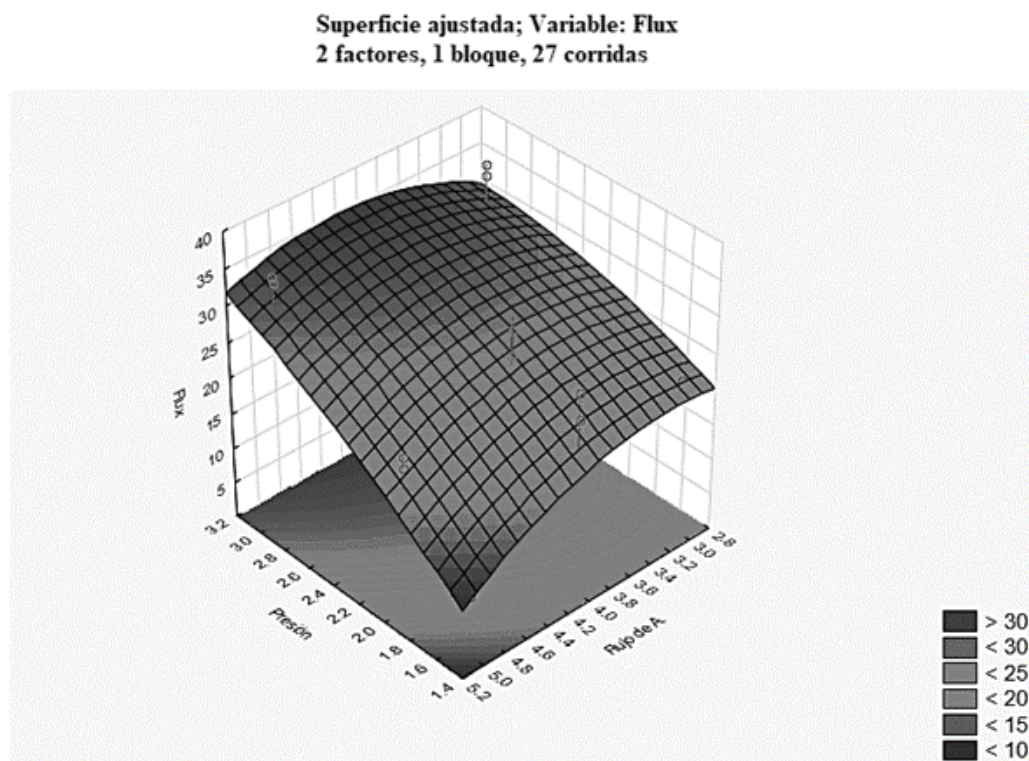
Tabla 2. Flux y porcentaje de colmatación registrados a diferentes condiciones de operación

| Prueba | Presión (bar) | Temperatura (°C) | Flujo de recirculación (L/min) | Flux (L/h·m <sup>2</sup> ) | Colmatación (%) |
|--------|---------------|------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------|
| 1      | 1.5           | 20               | 3                              | 21.2 ± 0.3d                | 38.8 ± 7b       |
| 2      | 2             | 20               | 4                              | 31 ± 2.4b                  | 38.1 ± 7bc      |
| 3      | 3             | 20               | 5                              | 34 ± 0.3ab                 | 37.7 ± 5a       |
| 4      | 1.5           | 25               | 4                              | 24 ± 3.9cd                 | 33.3 ± 6d       |
| 5      | 2             | 25               | 5                              | 20.4 ± 0.8 d               | 33.0 ± 6a       |
| 6      | 3             | 25               | 3                              | 38.8 ± 0.7a                | 23.7 ± 6cd      |
| 7      | 1.5           | 30               | 5                              | 10.5 ± 1.4e                | 22.2 ± 7a       |
| 8      | 2             | 30               | 3                              | 21.6 ± 3.5d                | 18.56 ± 7ab     |
| 9      | 3             | 30               | 4                              | 26.4 ± 1.5c                | 12.6 ± 7cd      |

Los valores son la media de n=3 ± D.S. Letras distintas en la fila, indica diferencia significativa en el flux y porcentaje de colmatación (p< 0.05).

La presión transmembrana juega un papel importante, ya que de acuerdo a la ley de Darcy (1856) a mayor presión ejercida mayor permeabilidad. Sin embargo, dependiendo de la naturaleza de los componentes en la solución de alimentación e interacciones con el material polimérico de la superficie de filtración, puede ocasionar deposiciones de partículas de mayor tamaño en la superficie de la membrana reduciendo el flux. Este efecto se ve contrarrestado con el flujo de alimentación, en un sistema de filtración tangencial, debido a que hay un efecto de arrastre de las partículas disminuyendo las obstrucciones en los poros de la membrana (Wei *et al.*, 2008).

Figura 2. Gráfica tridimensional para la respuesta flux ( $L/h \cdot m^2$ ) en función de la presión (Bar) y flujo de alimentación ( $L/min$ ) en el proceso de ultrafiltración.



## 2.3 Caracterización parcial de fructanos de agave con diferente grado de polimerización

### 3.3.1 Parámetros fisicoquímicos

Las fracciones de fructanos obtenidas no mostraron diferencia significativa en parámetros fisicoquímicos (TABLA 3), el pH y los sólidos solubles totales ( $^{\circ}\text{Brix}$ ) no se modificaron durante el proceso de separación con membranas, debido a que se realiza en un sistema con temperatura controlada y usando solo agua como solvente, esto evita la hidrólisis y la alteración de las características del producto, sin embargo, se observó un cambio en el contenido de azúcares totales (AT) y azúcares reductores directos (ARD), esto debido a que las membranas con mayor peso molecular de corte, dejan pasar a través de los poros los carbohidratos de bajo peso molecular o azúcares simples (glucosa, fructosa, sacarosa, entre otros), concentrando en el retenido las moléculas de mayor tamaño

que los poros de la membrana o las más ramificadas, que son retenidas debido a un posible entrecruzamiento con otras moléculas, esto explica, la presencia de trazas de compuestos con diferente GP en todas las fracciones.

Tabla 3. Características fisicoquímicas de las fracciones de fructanos de agave

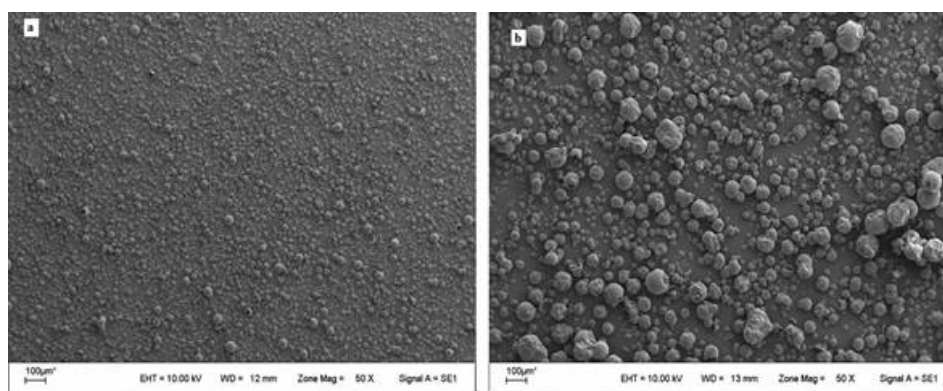
| Análisis         | 1 kDa        | 5 kDa        | 10 kDa       |
|------------------|--------------|--------------|--------------|
| SST (°Brix)      | 1.05 ± 0.08  | 5.7 ± 0.10   | 15.1 ± 0.16  |
| Humedad (g/100g) | 98.40 ± 0.12 | 95.72 ± 1.49 | 85.19 ± 1.0  |
| Cenizas (g/100g) | 0.04 ± 0.02  | 0.072 ± 0.00 | 0.12 ± 0.02  |
| pH               | 4.34 ± 0.25  | 4.58 ± 0.13  | 4.74 ± 0.04  |
| Turbidez (NTU)   | 4.2 ± 0.02   | 23.42 ± 0.05 | 18.86 ± 0.05 |
| AT (g/100g)      | 75.67 ± 0.3  | 97.8 ± 0.5   | 98.6 ± 0.5   |
| ARD (g/100g)     | 54.3 ± 0.08  | 4.4 ± 0.02   | 0.4 ± 0.04   |

Las fracciones obtenidas en el proceso de filtración fueron almacenadas a -20 °C hasta su estabilización en polvo.

### 2.3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las fracciones de fructanos de agave estabilizadas en polvo, presentaron forma esférica ahuecada (FIGURA 3a), esta característica en las partículas puede estar relacionada con la formación de vapor en su interior durante el proceso de secado por aspersión (Anandharamakrishnan y Padma-Ishwarya, 2015), lo que resulta favorable en los proceso de encapsulación de compuestos (Ceja-Medina *et al.*, 2020b; Cruz-Salas *et al.*, 2019; Ortiz-Basurto *et al.*, 2017; Ramos-Hernandez *et al.*, 2018), por otra parte, algunas partículas presentaron abolladuras en la superficie, este fenómeno puede estar relacionado con el rápido enfriamiento durante el proceso de secado (Saénz *et al.*, 2009; Tonon *et al.*, 2010). Finalmente, se observa una homogeneidad en el tamaño de las esferas (FIGURA 3b) que está estrechamente relacionada con las condiciones de proceso y pueden obtenerse partículas con tamaño igual o menores a 50µm (Chávez-Rodríguez *et al.*, 2014; Farías-Cervantes *et al.*, 2017; Gong *et al.*, 2008).

Figura 3. Microscopía electrónica de barrido, muestras en polvo,  
a) Fracción de alto grado de polimerización 100 X; b) Fructanos nativos de agave 100 X

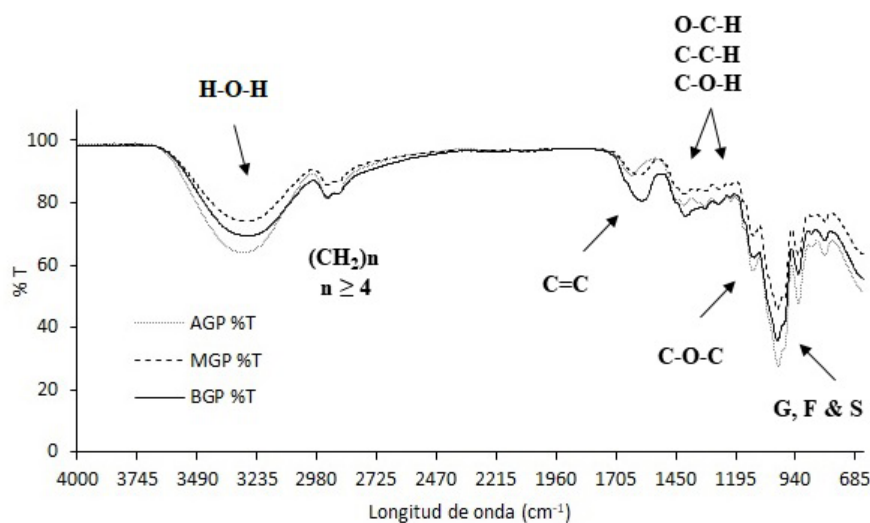


### 2.3.3 Espectro FT-IR de las fracciones de fructanos de agave de alto, intermedio y bajo grado de polimerización

El espectro FT-IR de las fracciones de fructanos de agave mostraron bandas características de los carbohidratos (FIGURA 4). Para las fracciones de AGP, IGP y BGP se obtuvieron bandas en el número de onda (WN) de  $3300\text{ cm}^{-1}$  que indican la presencia de grupos hidroxilo, la segunda banda se presenta a  $2940\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a enlaces C-H. En el WN  $2932\text{ cm}^{-1}$  se observó una banda característica en inulina de achicoria, también se muestra una banda a  $1591\text{ cm}^{-1}$  que según Cui *et al.* (2014) se atribuyen a la presencia de lignina encontrada comúnmente en extracciones de polisacáridos, las bandas a  $1410\text{ cm}^{-1}$  indican la presencia de enlaces  $\text{CH}_2\text{-OH}$  presentes en el anillo de fructosa, por otra parte, las bandas encontradas en la región de  $800$  a  $1100\text{ cm}^{-1}$  muestra estiramientos C-C y C-O propiamente de los carbohidratos (Apolinario *et al.*, 2017; Panchev *et al.*, 2011; Ramos-Hernández *et al.*, 2018).

A pesar de que las 3 fracciones de fructanos muestran similitud en las bandas, cada fracción presenta una intensidad diferente atribuida a la mayor o menor presencia de enlaces en las cadenas de polisacáridos, esto puede interpretarse como la diferencia en el grado de polimerización y contenido de monosacáridos en las cadenas.

Figura 4. Espectro FT-IR de las fracciones de fructanos de agave de alto, intermedio y bajo grado de polimerización



### 2.3.4 Propiedades térmicas de fructanos de agave de alto, intermedio y bajo grado de polimerización

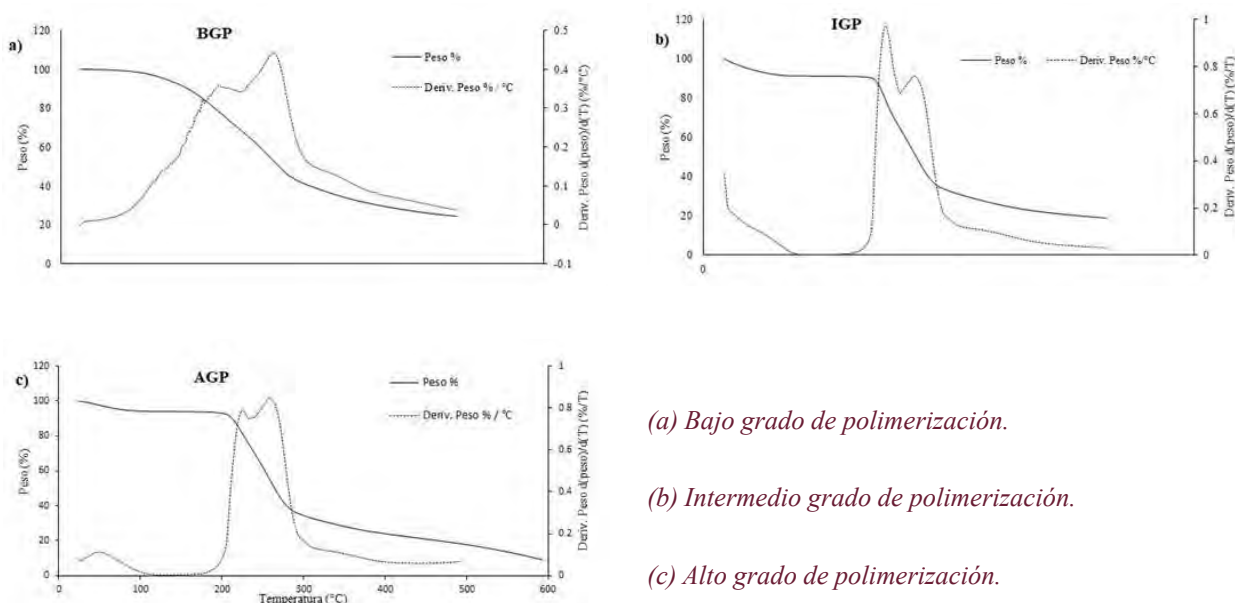
El análisis termogravimétrico (TGA) de las fracciones de fructanos de agave permite conocer la estabilidad térmica y la pérdida de masa que ocurre durante su descomposición (FIGURA 5). Las fracciones de fructanos muestran más de una transición durante su estudio, sin embargo, las muestras de intermedio y alto grado de polimerización muestran una mayor estabilidad en comparación de la fracción de bajo grado de polimerización que tiene un alto contenido de mono y disacáridos lo que la hace más susceptible a una rápida pérdida de masa. Estos resultados en su conjunto evidencian la diferencia de estabilidad térmica e higroscopicidad de las diferentes fracciones de fructanos de agave obtenidas. La fracción de bajo grado de polimerización (FIGURA 5a) no muestra transiciones definidas en los rangos de temperaturas iniciales ( $25$  a  $177.3\text{ °C}$ ), este rango de temperaturas está relacionado con la pérdida de agua y de azúcares susceptibles al calor como glucosa y fructosa ( $146$

El análisis termogravimétrico (TGA) de las fracciones de fructanos de agave permite conocer la estabilidad térmica y la pérdida de masa que ocurre durante su descomposición (FIGURA 5). Las



y 103 °C respectivamente), posterior a ello se muestra una segunda transición a una temperatura de 177.3 a 223.1 °C con una pérdida de masa de 15.9 % y una tercera transición de 224.7 a 308.6 °C con una pérdida de 75.6 %, que corresponde a fructanos con mayor grado de polimerización. La fracción IGP muestra una mayor estabilidad durante el proceso térmico (5b), se observan 3 transiciones, la primera en un rango de temperatura de 48.4 a 115.6 °C con una pérdida de 4.6 % de masa que corresponde al agua contenida en la muestra, en un rango de temperatura de 177.8 a 240.5 °C, se observa una pérdida de 26.2 % de masa que puede estar asociado al rompimiento de cadenas de fructanos de intermedio grado de polimerización. Finalmente, se observa en un rango de temperatura de 241.5 a 311.3 una última pérdida de masa que puede relacionarse con fructanos de alto grado de polimerización o bien con fructanos tipo inulina; por último, se observa la fracción AGP que muestra 4 transiciones (FIGURA 5C), nuevamente, la transición inicial está relacionada a la pérdida de humedad en la muestra y se da en un rango de temperatura de 26.9 a 113.3 °C con una pérdida de 5.8 %, seguida de tres transiciones que se presentan en un rango de temperatura de 143.1 a 418.2 °C con una pérdida de masa de 69.3 %, esta serie de transiciones, al igual que las muestras anteriores está relacionada con la ruptura de cadenas poliméricas de fructanos de agave con diferente grado de polimerización (Espinosa-Andrews y Rodríguez-Rodríguez, 2018; Leyva-Porras *et al.*, 2017); por otra parte, la presencia de fructanos aún en altas temperatura puede estar relacionada con la complejidad estructural que presentan (Mellado-Mojica *et al.*, 2017), ya que al contener estructuras lineales, estas son más resistentes y requieren mayor energía para romperse (Espinosa-Andrews y Urias-Silvas, 2012). Otros autores también demostraron la eficiencia de los fructanos de agave como material de pared, con evidente aumento de la resistencia térmica y protección de los compuestos encapsulados (Cruz-Salas *et al.*, 2019; Ramos-Hernández *et al.*, 2018).

Figura 5. Análisis termogravimétrico de las fracciones de fructanos de agave



Otro aspecto importante fue que las fracciones de IGP y AGP mostraron transiciones más definidas en comparación a la fracción de BGP, este factor está estrechamente relacionado con la reducción de glucosa y fructosa en las muestras. Por otra parte, las fracciones muestran un comportamiento similar entre sí durante el análisis térmico, pero, también se observa un corrimiento relacionado con el grado de polimerización. En conjunto con los resultados obtenidos en este estudio se demuestra

que las fracciones de fructanos de agave obtenidas en el proceso de ultrafiltración son una mezcla de estructuras ramificadas enriquecidas con bajo, intermedio y alto grado de polimerización, que presentan similitud en características fisicoquímicas, pero mejoran su estabilidad térmica con respecto a su grado de polimerización, por lo que la separación con membranas es un proceso efectivo para la obtención de fracciones de fructanos de agave que pueden ser utilizados como aditivos en la elaboración de diversos productos alimenticios.

### 3. Conclusiones

Las membranas de celulosa regenerada mostraron características de interés para la separación de fracciones de fructanos de agave enriquecidas con diferente grado de polimerización, presentando buena permeabilidad y una colmatación menor al 40 %.

Se obtuvieron fracciones enriquecidas con alto, intermedio y bajo GP usando las membranas de celulosa regenerada de 10, 5 y 1 kDa respectivamente, además de la obtención de azúcares simples y FOS en el permeado 1 kDa, que al concentrarse, permite la obtención de un jarabe prebiótico.

Las características fisicoquímicas de las tres fracciones de fructanos fueron muy similares, el porcentaje de azúcares reductores directos varió en cada una de las muestras, lo que influyó en su estabilidad térmica, donde se observó mayor resistencia térmica en relación al grado de polimerización.

La reducción de azúcares simples en la fracción enriquecida con fructanos de alto grado de polimerización, le confiere mayor estabilidad y propiedades tecnológicas de interés para ser utilizada como material de pared o estabilizante en la encapsulación de compuestos funcionales o de interés industrial.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo para el desarrollo del proyecto. CONACyT-México por financiamiento del proyecto FOP02-2021-04-316948 y la beca de estudiante número 253768. Este capítulo es parte de los productos de colaboración de miembros (LMT; MJF; MGL; RIOB) de la Red Nacional de Agaves (AGARED).

**Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



## 4. Referencias

- Aldrete-Herrera, P. I., López, M. G., Medina-Torres, L., Ragazzo-Sánchez, J. A., Calderón-Santoyo, M., González-Ávila, M., y Ortiz-Basurto, R. I. (2019). Physicochemical composition and apparent degree of polymerization of fructans in five wild agave varieties: Potential industrial use. *Foods*, 8(9), 1–11. <https://doi.org/10.3390/foods8090404>
- Anandharamakrishnan, C., y Padma-Ishwarya, S. (2015). Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation. In: *Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation*, 65-76. Wiley Blackwell, New York, <https://doi.org/10.1002/9781118863985>
- Apolinário, A. C., de Carvalho, E. M., de Lima Damasceno, B. P. G., da Silva, P. C. D., Converti, A., Pessoa, A., y da Silva, J. A. (2017). Extraction, isolation and characterization of inulin from Agave sisalana boles. *Industrial Crops and Products*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.045>
- Beine, R., Moraru, R., Nimtz, M., Na'amnieh, S., Pawlowski, A., Buchholz, K., y Seibel, J. (2008). Synthesis of novel fructooligosaccharides by substrate and enzyme engineering. *Journal of Biotechnology*, 138(1–2), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2008.07.1998>
- Ben Hassan, I., Ennouri, M., Lafforgue, C., Schmitz, P., y Ayadi, A. (2013). Experimental study of membrane fouling during crossflow microfiltration of yeast and bacteria suspensions: Towards an analysis at the microscopic level. *Membranes*, 3(2), 44–68. <https://doi.org/10.3390/membranes3020044>
- Ceja-Medina, Luis I., Jiménez-Fernández, M., Andrade-González, I., Navarrete-Guzmán, A., Chacón-López, M. A., García-Magaña, M. L., Bonilla-Cárdenas, J. A., y Ortiz-Basurto, R. I. (2020a). Microbiological stability and general sensory acceptance of microfiltered skim milk with agave fructans of a high degree of polymerization added. *Journal of Food Safety*, 40(5) 1-9. <https://doi.org/10.1111/jfs.12844>
- Ceja-Medina, Luis Isaac, Ortiz-Basurto, R. I., Medina-Torres, L., Calderas, F., Bernad-Bernad, M. J., González-Laredo, R. F., Ragazzo-Sánchez, J. A., Calderón-Santoyo, M., González-Ávila, M., Andrade-González, I., y Manero, O. (2020b). Microencapsulation of *Lactobacillus plantarum* by spray drying with mixtures of Aloe vera mucilage and agave fructans as wall materials. *Journal of Food Process Engineering*, (February), 1–12. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13436>
- Chávez-Rodríguez, A., López-Muraira, I. G., Gómez-Leyva, J. F., Luna-Solano, G., Ortiz-Basurto, R. I., y Andrade-González, I. (2014). Optimization of Agave tequilana Weber var. azul juice spray drying process. *Journal of Chemistry*. 2014 (915941) 1-10. <https://doi.org/10.1155/2014/915941>
- Cruz-Salas, C. N., Prieto, C., Calderón-Santoyo, M., Lagarón, J. M., y Ragazzo-Sánchez, J. A. (2019). Micro-and nanostructures of agave fructans to stabilize compounds of high biological value via electrohydrodynamic processing. *Nanomaterials*, 9(12), 1–12. <https://doi.org/10.3390/nano9121659>
- Cui, G., Zhang, W., Wang, Q., Zhang, A., Mu, H., Bai, H., y Duan, J. (2014). Extraction optimization, characterization and immunity activity of polysaccharides from *Fructus Jujubae*. *Carbohydrate Polymers*. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.04.041>
- Ding, L., Al-Akoun, O., Abraham, A., y Jaffrin, M. Y. (2002). Milk protein concentration by ultrafiltration with rotating disk modules. *Desalination*, 144(1–3), 307–311. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00334-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00334-X)
- Espinosa-Andrews, H., y Rodríguez-Rodríguez, R. (2018). Water state diagram and thermal properties of fructans powders. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6868-1>
- Espinosa-Andrews, H., y Urias-Silvas, J. E. (2012). Thermal properties of agave fructans (Agave tequilana Weber var. Azul). *Carbohydrate Polymers*, 87(4), 2671–2676. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.053>
- Fariás-Cervantes, V. S., Chávez-Rodríguez, A., Delgado-Licon, E., Aguilar, J., Medrano Roldan, H., y Andrade-González, I. (2017). Effect of spray drying of agave Fructans, Nopal mucilage and Aloe Vera juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(4), e13027. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13027>
- García-Gamboa, R., Gradilla-Hernández, M. S., Ortiz-Basurto, R. I., García-Reyes, R. A., y González-Avila, M. (2020). Assessment of intermediate-and long-chains agave fructan fermentation on the growth of intestinal bacteria cultured in a gastrointestinal tract. *Revista Mexicana de Ingeniera Química*. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio842>
- García, R., Isela, R., Basurto, O., Bravo, J., Elizabeth, B., Álvarez, R., y González, M. (2018). LWT- Food Science and Technology In vitro evaluation of prebiotic activity, pathogen inhibition and enzymatic metabolism of intes-

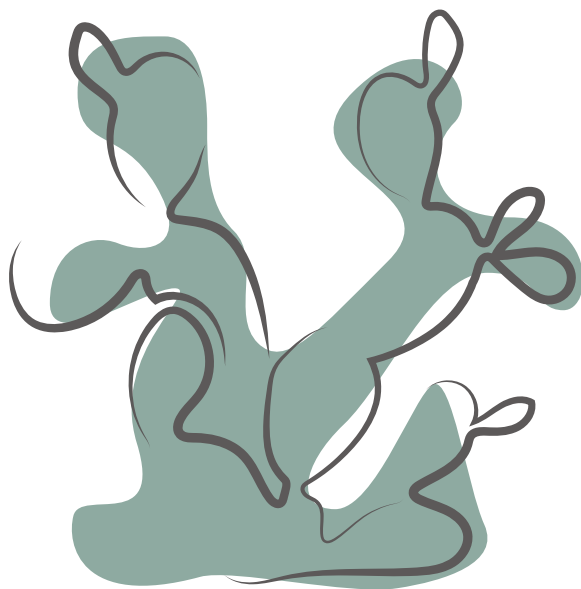
- tinal bacteria in the presence of fructans extracted from agave : A comparison based on polymerization degree. *LWT - Food Science and Technology*, 92(February), 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.051>
- Gong, Z., Zhang, M., Mujumdar, A., y Sun, J. (2008). Spray drying and agglomeration of instant bayberry powder. *Drying Technology*. 26 (1), 116–121. <https://doi.org/10.1080/07373930701781751>
- Jardines, A. P., Arjona-Román, J. L., Severiano-Pérez, P., Totosa-Sánchez, A., Fiszman, S., y Escalona-Buendía, H. B. (2020). Agave fructans as fat and sugar replacers in ice cream: Sensory, thermal and texture properties. *Food Hydrocolloids*. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106032>
- Jimenez-Sánchez, D. E., Calderón-Santoyo, M., Herman-Lara, E., Gaston-Peña, C., Luna-Solano, G., y Ragazzo-Sánchez, J. A. (2020). Use of native agave fructans as stabilizers on physicochemical properties of spray-dried pineapple juice. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1565575>
- Leyva-Porras, C., Saavedra-Leos, M. Z., López-Pablos, A. L., Soto-Guerrero, J. J., Toxqui-Terán, A., y Foza-do-Quiroz, R. E. (2017). Chemical, Thermal and Physical Characterization of Inulin for its Technological Application Based on the Degree of Polymerization. *Journal of Food Process Engineering*. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12333>
- Mellado-Mojica, E., González de la Vara, L. E., y López, M. G. (2017). Fructan active enzymes (FAZY) activities and biosynthesis of fructooligosaccharides in the vacuoles of Agave tequilana Weber Blue variety plants of different age. *Planta*, 245(2), 265–281. <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2602-7>
- Miramontes-Corona, C., Escalante, A., Delgado, E., Corona-González, R. I., Vázquez-Torres, H., y Toriz, G. (2020). Hydrophobic agave fructans for sustained drug delivery to the human colon. *Reactive and Functional Polymers*. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2019.104396>
- Ortiz-Basurto, R. I., Pourcelly, G., Doco, T., Williams, P., Dormer, M., y Belleville, M. P. (2008). Analysis of the main components of the aguamiel produced by the maguey-pulquero (*Agave mapisaga*) throughout the harvest period. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(10), 3682–3687. <https://doi.org/10.1021/jf072767h>
- Panchev, I., Delchev, N., Kovacheva, D., y Slavov, A. (2011). Physicochemical characteristics of inulins obtained from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). *European Food Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00217-011-1584-8>
- Ramos-Hernández, J., Ragazzo-Sánchez, J., Calderón-Santoyo, M., Ortiz-Basurto, R., Prieto, C., y Lagaron, J. (2018). Use of Electrospayed Agave Fructans as Nanoencapsulating Hydrocolloids for Bioactives. *Nanomaterials*, 8(11), 868. <https://doi.org/10.3390/nano8110868>
- Rodriguez Furlán, L. T., Aldrete Herrera, P., Pérez Padilla, A., Ortiz Basurto, R. I., y Campderrós, M. E. (2014). Assessment of agave fructans as lyoprotectants of bovine plasma proteins concentrated by ultrafiltration. *Food Research International*, 56, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.12.014>
- Santiago-García, P. A., Mellado-Mojica, E., León-Martínez, F. M., y López, M. G. (2017). Evaluation of Agave angustifolia fructans as fat replacer in the cookies manufacture. *LWT - Food Science and Technology*, 77, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.028>
- Sáyago-Ayerdi, S. G., Zamora-Gasga, V. M., y Venema, K. (2020). Changes in gut microbiota in predigested *Hibiscus sabdariffa* L calyces and Agave (*Agave tequilana* weber) fructans assessed in a dynamic in vitro model (TIM-2) of the human colon. *Food Research International*. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109036>
- Sri Abirami Saraswathi, M., Rana, D., Beril Melbiah, J. S., Mohan, D., y Nagendran, A. (2018). Effective removal of bovine serum albumin and humic acid contaminants using poly (amide imide) nanocomposite ultrafiltration membranes tailored with GO and MoS<sub>2</sub> nanosheets. *Materials Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.06.001>
- Sun, W., Liu, J., Chu, H., y Dong, B. (2013). Pretreatment and membrane hydrophilic modification to reduce membrane fouling. *Membranes*, 3(3), 226–241. <https://doi.org/10.3390/membranes3030226>
- Wei, S. D., Hossain, M. y Saleh, S. Z. 2008. Separation of polyphenolics and sugar by ultrafiltration: effects operating conditions on fouling an diafiltration. *International journal of chemical and biomolecular engineering*. Volumen 1. pp. 13-16
- Zamora-Gasga, Victor M., Bello-Pérez, L. A., Ortiz-Basurto, R. I., Tovar, J., y Sáyago-Ayerdi, S. G. (2014). Granola bars prepared with Agave tequilana ingre-

dients: Chemical composition and invitro starch hydrolysis. *LWT - Food Science and Technology*, 56(2), 309–314. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.016>

Zamora-Gasga, Victor Manuel, Loarca-Piña, G., Vázquez-Landaverde, P. A., Ortiz-Basurto, R. I., Tovar, J., y Sáyago-Ayerdi, S. G. (2015). Invitro colonic fermentation of food ingredients isolated from *Agave tequilana* Weber var. azul applied on granola bars. *LWT-Food Science and Technology*, 60(2), 766–772. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.032>

Zhan, W., Jin, L., Jiao, J., Zhang, X., Zhang, Y., Zhao, H., y Liang, M. (2018). Expression and purification of plant fructan exohydrolases and their potential applications in fructose production. *International Journal of Biological Macromolecules*, 108, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.110>

Zhu, Z., Luo, J., Ding, L., Bals, O., Jaffrin, M. Y., y Vorobiev, E. (2013). Chicory juice clarification by membrane filtration using rotating disk module. *Journal of Food Engineering*, 115(2), 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.028>



# Evolución y Actualidad de la Normativa de Uso y Regulación de Polímeros y Biopolímeros en la producción de plásticos

Ramos-Martínez, Osvaldo<sup>1</sup>  
Dlaikan-Castillo, Allan Daniel<sup>1</sup>  
Hernández-Figueroa, Fernando<sup>1</sup>  
González-Regalado, José de Jesús<sup>1</sup>  
Ortiz-Basurto, Rosa Isela<sup>1\*</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Posgrado e Investigación, TecNM-Instituto Tecnológico de Tepic, Av. Tecnológico 2595, Lagos del Country, C.P. 63175, Tepic Nayarit, México.

\* Correspondencia  
RIOB, <https://orcid.org/0000-0002-8284-4690>,  
riobasurt@tepic.tecnm.mx.

La falta de normativas y concientización para el aprovechamiento de fuentes biodegradables y renovables desencadenó el uso irracional de polímeros sintéticos, y con ello, la generación de grandes problemas de contaminación ambiental. A nivel internacional, son pocos los países con normativas que soportan la economía circular, y promueven la concientización sobre el grado de contaminación y daño al medio ambiente. Sobre esta base, algunos países están trabajando sobre la actualización de normativas aplicadas a la restricción de uso de polímeros sintéticos, favoreciendo el uso de biopolímeros, que además de contribuir a la economía circular, reduzcan la huella de carbono. Esta revisión presenta los eventos más importantes en México, Latinoamérica y a nivel internacional, sobre la evolución y actualidad de la normatividad de producción y uso de biopolímeros, que es un factor clave para el crecimiento y desarrollo de las industrias relacionadas con este sector. No obstante, existen vacíos y ambigüedades en el marco legal aplicado a los biopolímeros, por lo tanto, se requiere de acciones que lleven a una legislación sólida con impacto internacional. En concreto, los países más desarrollados implementan legislaciones para el uso de polímeros y biopolímeros que cumplan con los parámetros de calidad y sustentabilidad, para de esta manera lograr extrapolar los materiales poliméricos a los diferentes sectores industriales, como biorrefinerías, sector alimenticio, farmacéutico, entre otros.

**Palabras clave:** Biobasados; biopolímeros; normativas; polímeros; uso y regulación polímeros.

## Introducción

El desarrollo de polímeros sintéticos es uno de los grandes avances del siglo XX, por sus posibilidades de uso, en la industria y la vida cotidiana. Los polímeros sintéticos se obtienen del petróleo, generando plásticos los cuales son ampliamente usados principalmente por ser económicos, livianos, resistentes a la oxidación y en algunos casos reutilizables. Sin embargo, la alta resistencia a la corrosión, al agua y la descomposición bacteriana los convierte en residuos difíciles de eliminar, generando un problema ambiental. Se ha reportado que el polietileno y el polipropileno (bolsas de plástico) pueden tardar hasta 500 años en descomponerse (Barahona Alvear *et al.*, 2019).

El reciclado es una solución, que se produce sobre el residuo ya generado, pero no es una alternativa efectiva para todos los plásticos. Existen códigos de plásticos que permiten elegir y saber que plásticos se pueden reciclar, mediante una numerología, debido a que no todos los plásticos son reciclables o incluso reutilizables. Hay numerosos productos a base de plástico que no pueden degradarse, ni ser reciclados. Por lo que el símbolo que aparece en los envases como “triángulo con flechas en ciclo” (FIGURA 1) y productos plásticos no significa que el producto sea realmente reciclable.

Figura 1. Materiales poliméricos de acuerdo a su aplicación



Fuente: Elaboración propia con elementos liberados bajo licencia Creative Commons.

La inestabilidad de las grandes reservas mundiales, promueve el desarrollo de tecnologías que disminuyan la emisión de gases de efecto invernadero, como el CO<sub>2</sub>, lo cual, ha impulsado la elaboración de productos a partir de materias primas basadas en fuentes renovables.

Los biopolímeros se obtienen principalmente de recursos renovables, convirtiéndose en una alternativa para la industria de los plásticos. Estos biopolímeros pueden procesarse mediante las mismas



tecnologías que los materiales termoplásticos convencionales, tales como extrusión, inyección o soplado. Los biopolímeros se dividen en aquellos basados en recursos renovables y degradables que cumplen todos los criterios de las normas científicamente reconocidas para biodegradabilidad y compostaje de plásticos y productos plásticos (Villada *et al.* 2007).

Los biopolímeros se pueden clasificar según su fuente, dividido en tres subgrupos: polímeros biodegradables (almidón y celulosa), polímeros biodegradables basados en monómeros biodegradados (aceites vegetales y ácido láctico) y biopolímeros sintetizados por microorganismos (polihidroxialcanoatos, PHA) (Gómez Patiño *et al.*, 2018).

## 1. Evolución de la legislación de biopolímeros

En 1991, el Instituto para Investigación de Estándares (ISR) de la ASTM (American Society for Testing and Materials) con participación de 15 organizaciones, establecieron el Programa de Materiales Poliméricos Degradables con el objetivo de determinar el comportamiento de los materiales poliméricos degradables en sistemas de disposición reales, para asegurar su disposición y degradación. En 1996, se emitió la Guía Estándar para medir la compostabilidad de Plásticos Biodegradables y una base de datos bibliográfica con más de 6500 documentos. Los estándares de la ASTM deben ser actualizados y revisados al menos cada 5 años para permanecer activos y son reconocidos en todo el mundo (European Bioplastics, 2017).

En el año 2000, se creó el estándar EN (Norma Europea por sus siglas en inglés) 13 432 que indica los requerimientos de composición y biodegradabilidad que debe tener un material que será utilizado como empaque biodegradable, así como los criterios de evaluación para la aceptación final de un empaque, el cual ha sido implementado en toda la Unión Europea. En 2004, los productores firmaron un compromiso voluntario de certificación de sus productos, que fue reconocido por la European DG Enterprise. Con este compromiso, se recalcó la gran importancia de que los productos plásticos compostables o biodegradables cuenten con certificación (European Bioplastics, 2017; Scales, 2006).

En 2006, se creó el estándar EN 14995, que hace referencia a todo material plástico que sea compostable, el cual incluye todas las especificaciones y pruebas que debe pasar satisfactoriamente. Este estándar es para todo material plástico compostable que no vaya a ser utilizado como empaque. Para empaques, se debe aplicar la norma EN 13432 (European Bioplastics & Institute for Bioplastics and Biocomposites, 2017; Scales, 2006). Las principales pruebas que deben cumplir los materiales en las normas EN 13432 y EN 14995 incluyen test de composición química, para garantizar que el material no contenga metales pesados; test de biodegradabilidad en condiciones controladas, que es una prueba de consumo de oxígeno y producción de CO<sub>2</sub>, en la que se debe demostrar que al menos el 90 % del material se convierte en CO<sub>2</sub> en un lapso de 6 meses; prueba de desintegración, que consiste en que después de 3 meses de compostaje y un posterior tamizado con una malla de 2 mm, quede un máximo del 10 % de residuos comparado con la masa original; prueba de campo de compostabilidad en una planta industrial o semi-industrial, en la que se demuestre que el material no tiene influencia negativa alguna en el proceso de compostaje; y finalmente un test de ecotoxicidad, que es un examen del efecto del material compostable y/o biodegradable en el crecimiento de las plantas (Scales, 2006).

En 2011, se creó el estándar CEN/TS 16137 (Especificación Técnica del Comité Europeo de Normalización, por sus siglas en inglés), que hace referencia a la determinación del contenido de carbono biobasado en un material. En esta norma se especifica el método para determinar el contenido de

carbono biobasado en monómeros, polímeros y materiales plásticos y productos, basándose en la medición de contenido de C14. Actualmente, esta es la norma más importante para cualquier producto biobasado en el mercado. En este ensayo, se mide el contenido general de carbono de un material y se expresa el contenido de carbono biobasado como fracción de masa o porcentaje de masa. Además, el comité técnico 411 del CEN/TC está desarrollando más estándares para la determinación de contenido de carbono biobasado y contenido de masa biobasada en un producto, así como en criterios para la medición de la sustentabilidad de productos biobasados y temas relacionados (European Bioplastics, 2017).

Simultáneamente, en 2011 se emitió la regulación de la comisión europea No. 10/2011, que indica que los productos hechos de polímeros biobasados que estén en contacto con alimentos deben pasar por los mismos procedimientos de prueba que los productos de plástico convencional para acceder al mercado de la Unión Europea. En esta regulación, se especifican los requerimientos para los análisis de migración de componentes de los bioplásticos a los alimentos. Un valor de migración límite indica el máximo valor permitido de cantidad de un material para transportarse hacia el producto alimenticio. Este valor límite garantiza que el material en contacto con el alimento no supone un riesgo para la salud de los consumidores. Además de esta prueba, se especifica una lista de la composición que deben tener los materiales de múltiples componentes. Únicamente se consideran seguros aquellos materiales que están presentes en la lista y pueden ser utilizados (European Bioplastics, 2020)

En 2015, la Comisión Europea publicó el interés de fortalecer la propuesta de economía circular, cuya intención es cerrar el ciclo del carbono en Europa y asegurarse que los recursos no son desperdiciados, sino reintroducidos a la economía. Los bioplásticos son muy importantes en este contexto, ya que pueden reemplazar los recursos fósiles con recursos renovables. La propuesta llamada ‘Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy’, reconoce que los materiales biobasados ofrecen grandes ventajas debido a su renovabilidad, biodegradabilidad y compostabilidad. Este plan de acción incluye un conjunto de medidas potenciales, que pueden ser importantes para la migración hacia un modelo de economía circular, sin embargo, en esta propuesta no se sugieren legislaciones concretas (European Commission, 2015).

En cuanto a los países latinoamericanos, no se tiene un registro concreto de la evolución en el tiempo de las regulaciones aplicadas a biopolímeros.

## 2. Legislación a nivel global para biopolímeros

Sobre la base de la economía circular que busca la reducción de uso de polímeros no reciclables y con largos periodos de degradación al mayor uso de biopolímeros, se ha hecho indispensable actualizar la legislación sobre los tipos de polímeros que contribuyan con la reducción de contaminación ambiental. Sin embargo, todos los países tienen sus propios criterios sobre cómo regularlos, lo que lleva al análisis en diversas directrices de acuerdo a sus prioridades, recursos materiales, avances tecnológicos y legislativos para el manejo de estos.

En este sentido, la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) ha definido a los polímeros de bajo riesgo (PBR) como aquellos que tienen un bajo impacto sobre la salud humana, así como en el ambiente, en este grupo se encuentran los polímeros con alto peso molecular ( $\geq 1,000$  g/mol) los cuales presentan menor migración de componentes evitando daño a organismos vivos. Se propone que estos PBR, así como los polímeros de origen natural (biopolímeros), tengan

requisitos reglamentarios reducidos. En la mayoría de los países, los PBR no requieren trámites de registro extensos como una sustancia química. Los nuevos polímeros que no cumplen los criterios para considerarse PBR se deben clasificar como sustancias químicas regulares (OECD, 2018).

En 2007, la Unión Europea promulgó el Reglamento de Registro, Evaluación y Autorización de Sustancias Químicas (REACH, por sus siglas en inglés), con el objetivo de lograr para 2020 que los productos químicos se utilicen y produzcan con el mínimo efecto adverso sobre la salud humana y el medio ambiente. El REACH es el documento legislativo más ambicioso para la regulación de sustancias químicas modelo, que varios países han decidido seguir. Su publicación impactó el mercado de las sustancias químicas y los marcos jurídicos en muchas naciones (Andrew & Wright-Williams, 2018).

En la *TABLA 1* se muestra un cuadro comparativo entre los requerimientos para nuevos polímeros entre naciones.

Tabla 1. Cuadro comparativo sobre los requerimientos para registrar un material polimérico

| País      | Polímeros existentes                                                                     | Nuevos polímeros                                                                                                                                                                                     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Australia | Aquellos presentes en el AICS <sup>1</sup> no requieren notificación.                    | Los nuevos productos químicos (incluidos los polímeros) están sujetos a notificación, por lo general sólo se requiere un certificado de evaluación.                                                  |
| Europa    | Es necesario si el volumen del monómero o reactivo excede 1 ton/año. EC4 (N.º 1272/2008) | Exentos de REACH <sup>2</sup> si cumplen los criterios como PBR6. Deben presentar registro ante ECHA <sup>3</sup> .                                                                                  |
| EE. UU.   | Exentos de registro.                                                                     | No requiere permiso de manufactura o certificado si cumplen con los criterios definidos por la US-EPA. Los fabricantes e importadores están obligados a presentar un informe a la EPA <sup>5</sup> . |
| China     | La mayoría no se encuentran regulados.                                                   | Requiere una notificación simplificada o típica dependiendo del volumen del polímero a procesar aún si éste cumple los requisitos para ser un PBR6.                                                  |
| Japón     | Los polímeros PBR6 están exentos de la notificación obligatoria bajo la CSCL             | Los PBR6, requieren una notificación oficial por parte del gobierno. Regulados por el ISHL                                                                                                           |
| Corea     | La mayoría no se encuentran regulados.                                                   | Los PBR están exentos de notificación, es requerido un certificado de exención.                                                                                                                      |

<sup>1</sup>AICS (Inventario Australiano de Sustancias Químicas); <sup>2</sup>REACH (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas); <sup>3</sup>ECHA (Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas); <sup>4</sup>EC (Comisión Europea); <sup>5</sup>EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos); <sup>6</sup>PBR; (Polímero de Bajo Riesgo); <sup>7</sup>CSCL (Ley de Control de Sustancias Químicas de Japón). <sup>8</sup>ISHL (Ley de Seguridad Industrial y Salubridad Humana de Japón).

Fuente: Elaboración propia.

## 2.1 Legislaciones para la obtención y/o producción de biopolímeros

En la Unión Europea la producción de polímeros está regulada por el documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF), titulado “Producción de Polímeros”, el cual cumple la función de recoger las disposiciones dispuestas en el artículo 16, apartado 2, de la Directiva 96/61/CE de la directiva integral sobre el control de la contaminación (por sus siglas en inglés IPPC) (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2007). La Asociación Europea de Bioplásticos reporta que en el año 2017 el mercado de los bioplásticos presentó una capacidad de producción total de 2.05 millones de toneladas. Aunque esta cifra es inferior al 1 % del total de toneladas métricas de productos plásticos producidos cada año, se estimó un crecimiento de la capacidad de producción de bioplásticos del 20 % en cinco años. Entre las aplicaciones finales de los biopolímeros se resaltan los empaques con el 58 % del mercado, seguido por los textiles (11 %) y los productos de consumo (7 %) y aplicaciones para el transporte (7 %). Asimismo, son ampliamente necesarios en la agricultura, horticultura y dispositivos médicos (Shogren *et al.*, 2019).

En Estados Unidos los polímeros están regulados por la Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA). Sin embargo, los nuevos polímeros pueden quedar exentos de una notificación previa a la fabricación (por sus siglas en inglés PMN) si la fracción de oligómeros con un peso menor a 1 000 Da está por debajo del 5 %, o en el caso de un polímero de poliéster si sólo se han utilizado reactivos previamente aceptados por la TSCA. La legislación de EEUU permite a los fabricantes utilizar las normativas que consideren adecuadas para comercializar sus productos, las cuales se enmarcan dentro de la ley federal de comida, drogas y cosméticos (FFDCA) (TABLA 2).

Tabla 2. Tipos de notificaciones existentes para aditivos alimentarios de la ley federal de comida, drogas y cosméticos

| Autorización /Notificación requerida                                                     | Exención de autorización de la FDA                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aditivos directos (21 C.F.R. Part 170.3)                                                 | Reglamento TOR <sup>1</sup>                                                                                                                                                                 |
| Aditivos indirectos (21 C.F.R. Part 174-179)                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• GRAS auto determinado</li> <li>• GRAS enlistado de la FDA</li> <li>• GRAS aprobado por la FDA</li> <li>• Elaboración de expediente GRAS</li> </ul> |
| Notificaciones de sustancias en contacto con alimentos “Food Contact Notification” (FCN) | Ingrediente alimentario común antes de 1958                                                                                                                                                 |

<sup>1</sup>TOR (Regulación de umbral de tolerancia).

Fuente: (U.S. Food and Drug Administration (FDA)., 2019);

El Programa de avisos de prefabricación (PMN) por sus siglas en inglés, revisa los nuevos productos químicos bajo la Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA), que consiste en un proceso de revisión durante 90 días, se ha convertido en un mecanismo eficiente para identificar los nuevos productos químicos que son de mayor preocupación para la salud humana y el ambiente. El objetivo final de este análisis, es identificar y controlar riesgos a través de líneas disciplinarias y organizativas, así como evaluar inquietudes con respecto a los efectos en la salud, el medio ambiente, exposición, migración de componentes e impactos económicos (US EPA, 2016).

El uso de biopolímeros dentro de EU está regulado por la FDA, para su aplicación en el área de alimentos, los cuales requieren la clasificación GRAS, a continuación, se muestra una comparación entre un aditivo alimentario y una sustancia GRAS de acuerdo a los criterios vigentes en la legislación Estadounidense (TABLA 3).

Tabla 3. Comparación entre un aditivo alimentario y una sustancia GRAS

| Aditivo Alimentario                                                                                                     | Sustancia GRAS                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Los datos son evaluados exclusivamente por la FDA, siendo ésta quien brinda la autorización correspondiente.            | Existe un consenso a nivel de expertos que la sustancia es segura en las condiciones de su uso previsto. Los datos, en general, son de dominio público. |
| <i>En ambos casos es necesario probar la inocuidad de la sustancia a ser incluida en la elaboración de un producto.</i> |                                                                                                                                                         |

Fuente: (U.S. Food and Drug Administration (FDA)., 2019).

En Australia, la legislación ofrece un marco regulatorio similar al de sus homólogos europeos, denominado AICIS (por sus siglas en inglés: Esquema Australiano de Introducción de Productos Químicos Industriales). Dentro de este esquema se define como biopolímeros a aquellos que han sido sintetizados por células vivas y/o sus componentes. Todos aquellos que no son obtenidos de matrices biológicas, se clasifican como polímeros sintéticos. Sin embargo, un polímero hidrosoluble, con un coeficiente de octanol-agua bajo (Pow), un alto peso molecular ( $MW \geq 1000$  g/mol), fácilmente biodegradable, con nula o muy poca capacidad de migración es considerado de bajo riesgo.

Todos los productos químicos nuevos en Australia (incluidos los polímeros) están sujetos al proceso de notificación, para lo cual existen dos categorías: permisos y certificados de evaluación. Los polímeros generalmente requieren sólo certificados de evaluación (limitado, estándar o PBR), dependiendo de su peso molecular promedio y propiedades fisicoquímicas (Australian Government Department of Health, 2016). Las sustancias clasificadas como “químicos naturales” se encuentran exentos de registro, si se demuestra que han sido extraídas por medio de los procesos amigables con el medio ambiente (TABLA 4).

Tabla 4. Procesos de extracción que no causan cambios químicos de acuerdo con la legislación australiana

| Proceso          | Definición                                                                                       |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Filtración       | Es la separación física de un sólido presente en un líquido al pasar por un medio poroso.        |
| Centrifugación   | Las partes sólida y líquida de una mezcla son separadas por métodos mecánicos y/o gravitatorios. |
| Sedimentación    | Las partes sólida y líquida de una mezcla son separadas por medio de la acción de la gravedad.   |
| Prensado en frío | Una mezcla líquido-sólido es separada por medio de un prensado para obtener la fracción líquida. |
| Tamizado         | Los sólidos en una mezcla son separados de acuerdo a su tamaño de partícula.                     |

|                                                    |                                                                                 |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Disolución en Agua                                 | Utilizada como un solvente para separar los compuestos presentes en una mezcla. |
| Floculación                                        | Si está separada de rocas o sedimentos usando un proceso de floculación.        |
| Aplicación de calor para remover el exceso de agua | Secar una sustancia para eliminar el exceso de agua en su composición           |

Fuente: Australian Industrial Chemicals Introduction Scheme. Disponible en: <https://cutt.ly/pkdmqrT> Accesado: 19 diciembre 2020.

En China, la legislación sobre sustancias químicas, los polímeros que no figuran en el IECSC (Inventario de sustancias químicas existentes producidas o importadas en China) se consideran como nuevas sustancias químicas. Las empresas chinas deben notificar la nueva sustancia química al Centro de Registro de Productos Químicos (CRC) antes de fabricarla o importarla. Las empresas extranjeras pueden notificar la introducción de una nueva sustancia mediante el nombramiento de un agente local. China ha decidido homologar la definición de polímero de bajo riesgo (PBR) de la OCDE a pesar de no pertenecer a dicha organización, lo que se traduce en un esquema compatible con sus contrapartes europeas (TABLA 5).

Tabla 5. Criterios para definir un polímero de bajo riesgo (PBR) en China

| Criterios                                                                                                                                     | Tipo de notificación requerida             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Peso molecular entre 1000 a 10,000 Da                                                                                                         |                                            |
| Los oligómeros con un peso molecular < 500 Da no deben exceder el 10 % del peso y aquellos <1 000 Da, el 25 %                                 | *Simplificada bajo condiciones especiales. |
| No deberán contar con grupos funcionales altamente reactivos (Ej. Metales Pesados).                                                           | **Simplificada bajo condiciones básicas    |
| El peso molecular promedio es mayor a 10 000 Da, así mismo, el porcentaje en peso de los oligómeros < 500 Da es menor al 2 % y <1 000 el 5 %. | ***Típica                                  |

*\* Si los monómeros se encuentran listados en el IECSC o cumplen al menos uno de los criterios de PBR, \*\* Si no se encuentran listados y el volumen de producción ≤ 1 ton/año \*\*\* Si el volumen de producción excede la tonelada por año.*

Fuente: Practical guidance on new chemical notification in China (Powell, 2011)  
Disponible en: <https://cutt.ly/rkdmPXW>. Accesado: 19 diciembre 2020.

Tabla 6. Requisitos de acuerdo al tipo de notificación

| Tipo de notificación                     | Información requerida                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Simplificada bajo condiciones especiales | <p>*Lista de los reactivos y monómeros, incluyendo el nombre, el CAS, el contenido de los monómeros y reactivos en caso de estar presente en el IECSC.</p> <p>*Peso molecular y su distribución incluyendo los resultados analíticos correspondientes.</p> <p>*Descripción del mecanismo de polimerización, diagramas de flujo o de manufactura.</p> |



|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       | <p>*Información sobre las composiciones incluyendo los resultados analíticos.</p> <p>*Información fisicoquímica existente (Punto de fusión, coeficiente octanol-agua y solubilidad en agua).</p> <p>*Al menos 1 de 3 de estos análisis debe realizarse en un laboratorio homologado: biodegradabilidad, toxicidad aguda usando <i>Brachydanio rerio</i> y/o lombrices domésticas según las propiedades de la sustancia.</p> |
| Simplificada bajo condiciones básicas |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Típica                                | Los mismos requisitos que en la simplificada bajo condiciones básicas, incluyendo pruebas adicionales sobre solubilidad y estabilidad.                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

Fuente: Practical guidance on new chemical notification in China (Powell, 2011). Disponible en: <https://cutt.ly/rkdmPXW>.

En Japón, los polímeros están regulados principalmente por la Ley de Control de Sustancias Químicas (CSCL), pero también por la Ley de Seguridad Industrial y Salud (ISHL). Los nuevos polímeros son regulados principalmente por ésta última, necesitan emitir notificaciones de forma anual, a menos que estén exentos como es el caso de un polímero de bajo riesgo (PBR) o estén elaborados a base de un polímero cuyos monómeros están en la lista ENCS (Nuevo Inventario de Sustancias Químicas), o un copolímero que contiene no más del 1 % (p/p) de un nuevo producto químico, o 2 % (p/p) de un producto químico existente. Japón como muchos otros países miembros de la OCDE han homologado sus criterios sobre los polímeros de bajo riesgo (PBR) y es el ISHL la dependencia gubernamental encargada de verificar el cumplimiento de dichos criterios (Ministry of Health Labour and Welfare Japan, 2019).

Las compañías están obligadas a reportar los siguientes detalles antes de importar y/o manufacturar un nuevo material polimérico:

1. Si el polímero se encuentra positivamente cargado.
2. Si su contenido en carbono es menor al 32 % (p/p).
3. Tiene enlaces covalentes con átomos distintos al S, Si, O, H, C, N.
4. Tiene enlaces iónicos con átomos distintos al Al, K, Ca, Na, Mg.
5. Es extraído de un organismo y sus derivados, conteniendo estructuras químicas similares.
6. Posee compuestos con grupos halogenados, cianurados y reactivos.
7. Poseen el riesgo de descomponerse a temperatura ambiente y presión estándar.

En Corea del Sur, los polímeros no están exentos de registro, pero requieren menos requisitos en comparación a las sustancias químicas. Sin embargo, los polímeros de bajo riesgo definidos por decreto presidencial, están exentos del registro. Los fabricantes e importadores tienen que solicitar con antelación un certificado de evaluación. Los polímeros se encuentran regulados mediante la TCCA (Ley de control de sustancias tóxicas) sin embargo, al cumplir al menos uno de los criterios podrá exentar dicha regulación.

Polímeros que contienen reactivos o monómeros al 2 % en peso que no figuran en el Inventario de Productos Químicos Existentes de Corea (KECI):

- Polímero de injerto, si el tallo y todas las ramas están listados en el KECI;
- Polímero de bloque, si todos los bloques están listados en el KECI;

- Polímero de bajo riesgo (PBR): Polímeros no iónicos con  $M_w \leq 10,000$  Da;
- Polímero no iónico con  $M_n \geq 1000$ , que cumple las siguientes condiciones;
- No se sintetizan a partir de productos químicos tóxicos, productos químicos autorizados sólo para investigación o nuevos productos químicos.
- Compuestos epóxidos (éteres cíclicos formados por un átomo de oxígeno unido a dos átomos de carbono, unidos entre sí mediante un solo enlace covalente).
- La solubilidad en agua debe ser menor o igual a 5mg/g a pH 2,7 y 9.

En el caso de los polímeros que cumplan los criterios de exención, los fabricantes e importadores de Corea solicitarán a la Asociación Coreana de Gestión de Productos Químicos (KCMA) la confirmación de la exención. En el caso de los nuevos polímeros que no estén exentos, los fabricantes e importadores podrán presentar una notificación al Instituto Nacional de Investigación Ambiental (NIER) con requisitos reducidos (Estreicher, 2015).

### 3. Biopolímeros en Latinoamérica y México

La legislación de biopolímeros en Latinoamérica ha evolucionado conforme el paso de los años, en los distintos países que conforman América Latina se modifican según la conveniencia y exigencia de cada país. Existen diversas normas o leyes para polímeros y biopolímeros en Latinoamérica, algunas de las cuales se resumen en la *TABLA 7*. Debido a la nula existencia de normas para polímeros y biopolímeros, específicamente enfocados a material plástico, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) publicó en 2009 la primera norma IRAM 29420:2009 "Materiales plásticos biodegradables y/o compostables", la cual dio pauta a la elaboración de normas que especificaran los tratos y usos de los polímeros-biopolímeros en la industria y medio ambiente, tal es el caso de las normas IRAM 29421:2011, IRAM 29422-1:2015 e IRAM 29424:2015 (IRAM, 2016).

En 2016 se estableció en México la declaratoria de vigencia de la norma mexicana NMX-E-267-CNCP-2016, sobre la industria del plástico-plásticos biobasados-métodos de prueba, la cual se basa en la Ley 7319 de la Provincia de Mendoza, que establece la obligatoriedad del uso de un 75 % como mínimo de material biodegradable en las bolsas. Pese a que no especifica varios términos básicos como la biodegradabilidad, define de forma clara las especificaciones de un biobasado que consiste en polímeros sintetizados por organismos vivos, como es el caso de los polisacáridos, la celulosa, aceites vegetales, proteínas entre otros, los cuales después de su extracción y purificación pueden ser utilizados directamente en diversas aplicaciones industriales (SEGOB, 2017).

Otro país latinoamericano que destaca por su legislación en el trato de polímeros-biopolímeros es Brasil, dirigiéndose al sector de las biorrefinerías con la ley de Política Nacional de Biocombustibles: RenovaBio (Ley N.º 13.576) en 2017, con el fin acrecentar la producción de biocombustibles y controlar la producción en cuanto a contaminantes y residuos (RenovaBio, 2017).

A pesar de la existencia de normas en Latinoamérica, las empresas encargadas de producir o transformar polímeros-biopolímeros se rigen bajo las normas internacionales mencionadas anteriormente, esto debido al interés de cumplir con las exigencias internacionales para lograr la exportación y/o comercialización de productos. Cada empresa se adapta a las normas impuestas por el país al cual desea comercializar, sin embargo, es necesario la actualización de legislaciones que cumplan los estándares a nivel internacional.

Tabla 7. Normas para polímeros y biopolímeros en países latinoamericanos

| País      | Norma                                                                                                                                                                  |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Argentina | IRAM 29421:2011 Materiales plásticos biodegradables y/o compostables.                                                                                                  |
| Argentina | IRAM 29421:2011. Calidad ambiental. Materiales y productos plásticos biodegradables y compostables. Requisitos para su validación mediante compostaje.                 |
| Argentina | IRAM 29422-1:2015. Determinación de la biodegradabilidad aeróbica última de los materiales plásticos bajo condiciones controladas de compostaje.                       |
| Brasil    | RenovaBio (Ley N.º 13.576). Política nacional de combustible.                                                                                                          |
| Chile     | Ley 20.920. Legislación de residuos. Responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje.                                                                   |
| Colombia  | Resolución no. 0938. Obtención y utilización de actividades enzimáticas de origen microbiano para la producción y utilización de biopolímeros.                         |
| México    | MEXICANA NMX-E-267-CNCP-2016, Industria del plástico-plásticos biobasados-métodos de prueba.                                                                           |
| Perú      | Ley No. 4476. Ley que prohíbe el uso y aplicación de sustancias de relleno denominadas biopolímeros, polímeros y afines a tratamientos corporales con fines estéticos. |

Fuente: (IRAM, 2016; SEGOB, 2017; RenovaBio, 2017)

## 4. Conclusiones y perspectivas

El uso de materiales poliméricos se ha convertido en una necesidad cada vez más fuerte. Este mercado tiene un crecimiento predicho del 36 % para los próximos 5 años (European Bioplastics - EUBP, 2021). Según François de Bie (European Bioplastics - EUBP, 2021), la industria de los bioplásticos es muy importante en la consecución de una economía circular, lo cual es fundamental para asegurar un futuro sustentable.

Dentro de las regulaciones o legislaciones aplicadas a nivel mundial se encuentran la AICIS (Esquema Australiano de Introducción de Productos Químicos Industriales), Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA) en E.U.A. y documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF) en Europa. Un producto elaborado con base a los estándares de estas normas, es aceptado en la mayor parte de los mercados a nivel internacional.

Es clara la importancia de la utilización de biopolímeros para reducir el daño al medio ambiente y establecer las políticas de la economía circular, no obstante, como se ha presentado en esta revisión, hay una falta de regulaciones y medidas concretas para la producción y utilización de este tipo de materiales en específico, ya que, en algunos países, principalmente de Latinoamérica, las normativas que se aplican son las de biopolímeros tradicionales. Teniendo en cuenta este contexto, se espera que, en los próximos años, los gobiernos, las empresas y los organismos competentes, lleguen a acuerdos y se haga una regulación completa del proceso de producción de biopolímeros, así como de su utilización y posterior disposición, de forma que se cumpla adecuadamente con el ciclo de la economía circular, para generar materiales poliméricos sustentables y seguros, que permitan la reducción de residuos contaminantes.

**Contribuciones de los autores:** Los autores agradecen al CONACyT-México por las becas de estudiantes de Maestría en Ciencias en Alimentos número(s): 1034174; 1057585; 326424 y 1009615.

**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

**Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## 5. Referencias

- Andrew, D. J., Wright-Williams, S. L. (2018) REACH. In *Issues in Toxicology*. <https://doi.org/10.1039/9781782622222-00468>
- AGDH "Australian Government Department of Health". (2016). *Chemicals banned or severely restricted in Australia FactSheet. National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme*.
- Barahona Alvear, N. S., Tixi Toapanta, H. P., Hugo Calderón, S., & Barahona Alvear, L. (2019). Biopolímeros capaces de reemplazar a los plásticos tradicionales. *Ciencia Digital*. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i4.954>
- Ecosoluciones Vertedero Cero. (2018). *Tipos de plásticos y sus números [Internet document]* URL <https://www.vertederocero.com/tipos-de-plasticos-y-sus-numeros/>. Accessed 15/01/2021.
- Estreicher, H. (2015). *South Korea REACH by Keller and Heckman*. <https://www.khlaw.com/webfiles/KREACHscorecard.pdf>
- European Bioplastics - EUBP. (2021). *Review of the 15th European Bioplastics Conference 2020*. <https://www.european-bioplastics.org/review/>
- European Bioplastics, & Institute for Bioplastics and Biocomposites. (2017). *Bioplastics market data. In European Bioplastics*.
- European Bioplastics, J. (2020). *Global Production Capacities of Bioplastic 2019-2024*. European Bioplastic.
- European Commission. (2015). *Closing the Loop - An EU action plan for the Circular Economy - (ANNEX 1). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*.
- Gómez Patiño, M., Cruz Barroso, M., Perea Flores, M., & Arrieta Baez, D. (2018). *Obtención de biopolímeros a partir de residuos de jitomate (Solanum lycopersicum) mediante cloruro de colina:2ZnCl2 y DCC/DMAP. Avances En Ciencias e Ingeniería*.
- IRAM "Instituto Argentino de Normalización y Certificación" (2016). *Materiales plásticos y biodegradabilidad de bolsas plásticas (UBATEC (ed.)). Instituto Argentino de Normalización y Certificación*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2007). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea Producción de Polímeros. In Mejores Técnicas disponibles de referencia europea-*.
- Ministry of Health Labour and Welfare Japan. (2019). *Food for Specified Health Uses (FOSHU)*. Ministry of Health Labour and Welfare Japan.
- OECD "Organisation for Economic Co-operation and Development". (2018). *Improving Markets for Recycled Plastics: Trends, Prospects and Policy Responses. Policy Highlights*. OECD Publishing.
- Powell, J. (2011). *Practical guidance on new chemical notification in China. The Attorneys and Scientists of Keller and Heckman LLP*. [http://www.cirsreach.com/China\\_Chemical\\_Regulation/Guidance\\_New\\_Chemical\\_Registration\\_China.pdf](http://www.cirsreach.com/China_Chemical_Regulation/Guidance_New_Chemical_Registration_China.pdf)
- RenovaBio. (2017). *Lei n. 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial Da União*.
- Scales, L. (2006). *Guidelines for the Use of the Seedling logo. Leadership*.
- SEGOB "Secretaría de gobierno" (2017). *Declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana NMX-E-267-CN-CP-2016*. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5475121&fecha=02/03/2017](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5475121&fecha=02/03/2017)
- Shogren, R., Wood, D., Orts, W., & Glenn, G. (2019). *Plant-based materials and transitioning to a circular economy. In Sustainable Production and Consumption*. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.04.007>
- U.S. Food and Drug Administration (FDA). (2019). *Food additive status list. U.S. Food and Drug Administration*.
- US EPA. (2016). *TSCA Chemical Substance Inventory*. Washington, DC: U.S. Environment Protection Agency.

Villada, H. S., Acosta, H., & Velasco, R. (2007). Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables. *Temas Agrarios*. <https://doi.org/10.21897/rta.v12i2.652>

