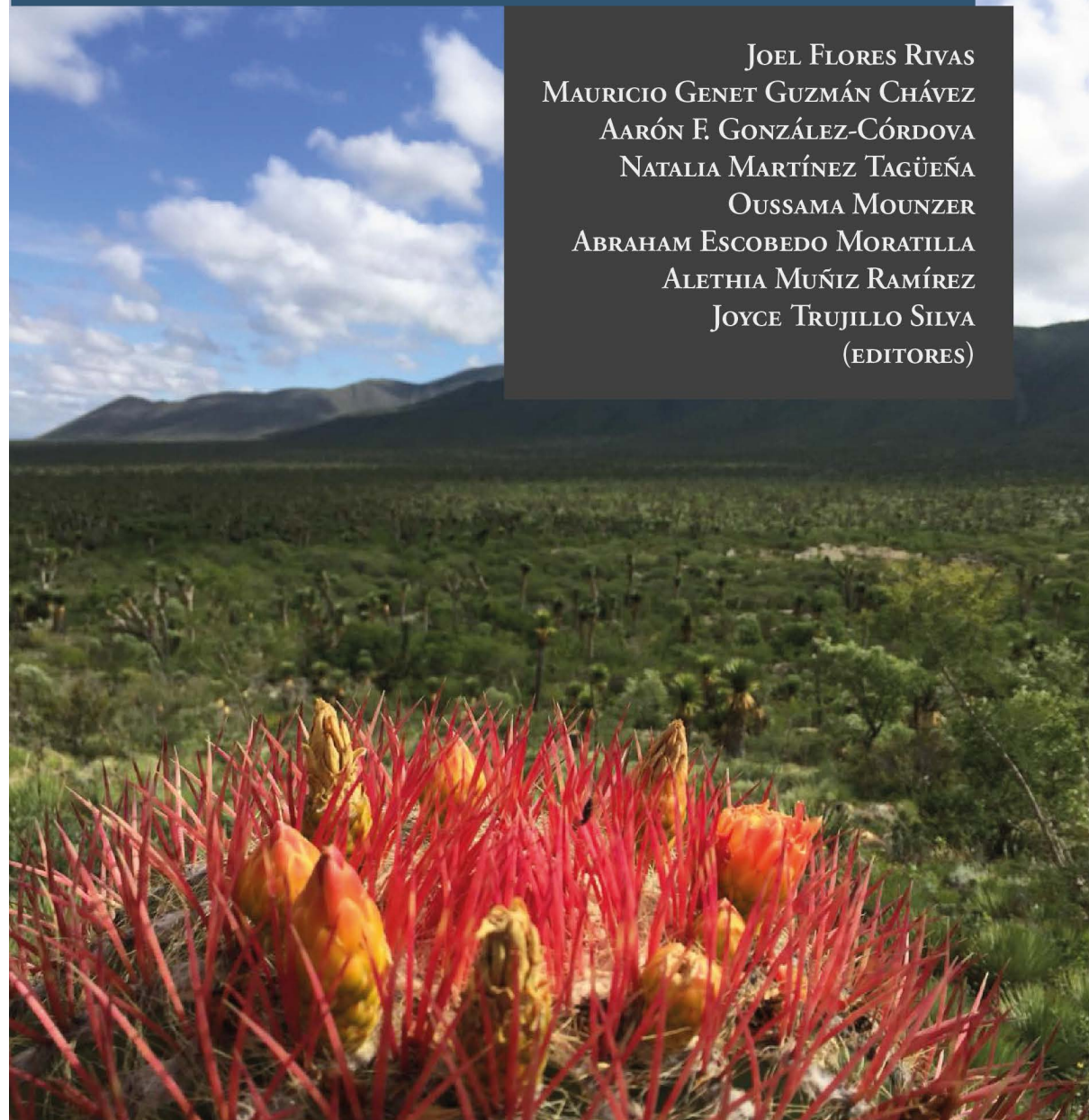


Recursos naturales de las zonas áridas. Diversidad, aprovechamiento, salud y alimentación

JOEL FLORES RIVAS
MAURICIO GENET GUZMÁN CHÁVEZ
AARÓN F. GONZÁLEZ-CÓRDOVA
NATALIA MARTÍNEZ TAGÜEÑA
OUSSAMA MOUNZER
ABRAHAM ESCOBEDO MORATILLA
ALETHIA MUÑIZ RAMÍREZ
JOYCE TRUJILLO SILVA
(EDITORES)



Recursos naturales de las zonas áridas

Diversidad, aprovechamiento, salud y alimentación

COLECCIÓN INVESTIGACIONES

RECURSOS NATURALES DE LAS ZONAS ÁRIDAS

DIVERSIDAD, APROVECHAMIENTO,
SALUD Y ALIMENTACIÓN

Editores

JOEL FLORES RIVAS

IPICYT, División de Ciencias Ambientales

MAURICIO GENET GUZMÁN CHÁVEZ

El Colegio de San Luis

AARÓN F. GONZÁLEZ-CÓRDOVA

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo

NATALIA MARTÍNEZ TAGÜEÑA

CONAHCYT-IPICYT, División de Ciencias Ambientales

OUSSAMA MOUNZER

Centro de Investigación en Química Aplicada

ABRAHAM ESCOBEDO MORATILLA

IPICYT; adscripción actual: Health Affairs Consulting S.A.P.I. de C.V.

ALETHIA MUÑIZ RAMÍREZ

CONAHCYT-IPICYT, División de Materiales Avanzados

JOYCE TRUJILLO SILVA

CONAHCYT-IPICYT, División de Materiales Avanzados



IPICYT
INSTITUTO POTOSINO DE
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
Y TECNOLÓGICA, A.C.



CIQA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN QUÍMICA APLICADA



CENTRO DE
INVESTIGACIONES
BIOLÓGICAS DEL
NOROESTE, S.C.



338.0972
R311

Recursos naturales de las zonas áridas : Diversidad, aprovechamiento, salud y alimentación [Libro electrónico] / editores Joel Flores Rivas, Mauricio Genet Guzmán Chávez, Aarón F. González-Córdova, Natalia Martínez Tagüeña, Oussama Mounzer, Abraham Escobedo Moratilla, Alethia Muñiz Ramírez, Joyce Trujillo Silva. - - 1ª edición. - - San Luis Potosí, San Luis Potosí : El Colegio de San Luis, A.C., Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C., Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Centro de Investigación en Química Aplicada, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C., Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.,2024.

1 recurso en línea (707 páginas) : Incluye glosarios, cuadros e ilustraciones.- - (Colección Investigaciones)

Incluye bibliografía al final de cada capítulo y notas a pie de página e índice (páginas 7 -11)

ISBN PDF COLSAN: 978-607-2627-12-3

ISBN PDF IPICYT: 978-607-26762-0-6

ISBN PDF CIAD: 978-607-7900-66-5

ISBN PDF CIQA: 978-607-97394-4-7

ISBN PDF CIATEJ: 978-607-8734-80-1

ISBN PDF CIBNOR: 978-607-7634-46-1

1. Recursos naturales – México 2. Recursos naturales – conservación y preservación 3. Desarrollo sostenible – México 4. Regiones áridas -México I. Flores Rivas, Joel, edit. II. Guzmán Chávez, Mauricio, edit.

ÍNDICE

Introducción	13
<i>Joel David Flores Rivas; Natalia Martínez Tagüeña; Alethia Muñiz Ramírez y Joyce Trujillo Silva</i>	

SECCIÓN I

DIVERSIDAD Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES

Capítulo 1

Biodiversidad y ecología de los desiertos mexicanos	29
<i>Alfredo Ramírez-Hernández y Joel Flores</i>	

Capítulo 2

La modulación del fitobioma: cómo hacer florecer el desierto sin ocasionar un desastre ecológico	57
<i>Ana Sofía Ramírez-Pelayo; Alfredo Ramírez-Hernández y Jorge Verdín</i>	

Capítulo 3	
Leguminosas de los desiertos Chihuahuense y Sonorense; diversidad, aportes a la dieta, a la medicina tradicional y potencial tecnológico	97
<i>Gabriela Ramos Clamont Montfort; María Cristina Cueto Wong y Gabriela Vargas González</i>	
Capítulo 4	
Los agaves: su importancia a través del tiempo	139
<i>Eugenia Lugo Cervantes y Montserrat Alcázar Valle</i>	
Capítulo 5	
Fundamentos y retos actuales para el desarrollo de los potenciales terapéuticos del peyote en México.	161
<i>Raúl Abel Vaca y Mauricio Genet Guzmán Chávez</i>	
Capítulo 6	
La importancia de los insectos y otros artrópodos en el conocimiento tradicional de las zonas áridas	195
<i>Alfredo Ramírez-Hernández; Alethia Muñiz-Ramírez; Joyce Trujillo y Francisco Ortiz</i>	
Capítulo 7	
Prospección del potencial biotecnológico de bacterias epífitas aisladas de plantas desérticas y semidesérticas	227
<i>Cecilia Castro-López; Manuel A. Vargas-Ortiz; Aarón F. González-Córdova; Belinda Vallejo-Córdova y Adrián Hernández-Mendoza</i>	
Capítulo 8	
Poblaciones silvestres de <i>Capsicum annuum</i> var. <i>Glabriusculum</i> : Características ambientales y estrategias de conservación	251
<i>Martín Esqueda; Aldo Gutiérrez; Martha L. Coronado; Osiris Álvarez-Bajo y Georgina Vargas</i>	

Capítulo 9
Secado del chiltepín: Tecnología para Comunidades Rurales . . . 275
Luz del Carmen Montoya-Ballesteros y Alberto González-León

Capítulo 10
La agricultura orgánica: Un acercamiento
a la agricultura sostenible en Baja California Sur 303
*Alejandra Nieto-Garibay; Enrique Troyo-Diéguez; Martín Aguilar-
García; Félix Alfredo Beltrán-Mortales y Bernardo Murillo-Amador*

SECCIÓN II
ALIMENTACIÓN

Capítulo 11
Gestión de la inocuidad agroalimentaria: frutas y hortalizas . . . 337
*Irene Iliana Ramírez Bustos; Irasema Vargas Arispuro;
Emmanuel Aispuro Hernández; Carlos Gabriel Borbón Morales
y Miguel Ángel Martínez Téllez*

Capítulo 12
Cactáceas comestibles: alimentos de consumo tradicional
y una fuente potencial de compuestos con actividad biológica . . . 359
*A. Alejandra López-Pérez; Lourdes Santiago-López;
Adrián Hernández-Mendoza; Belinda Vallejo-Córdoba
y Aarón Fernando González Córdoba*

Capítulo 13
Casos de éxito en la industria alimentaria
con recursos originarios de zonas áridas de México 385
*Aarón Fernando González-Córdoba; Adrián Hernández-Mendoza;
Belinda Vallejo-Córdoba y Manuel Vargas-Ortiz*

Capítulo 14	
Bebidas alcohólicas tradicionales	
de zonas áridas: Bacanora y Sotol	411
<i>Belinda Vallejo-Córdoba; Lilia María Beltrán-Barrientos;</i>	
<i>Ricardo Reyes-Díaz; María del Carmen Estrada-Montoya;</i>	
<i>María de Jesús Torres-Llenez; Adrián Hernández-Mendoza</i>	
<i>y Aarón Fernando González-Córdoba</i>	

Capítulo 15	
Exudados de plantas de las zonas áridas	
en la tecnología de masa congeladas	431
<i>Perla G. Armenta-Aispuro; Yolanda L. López-Franco;</i>	
<i>Ofelia Rouzaud-Sández; Jaime Lizardi-Mendoza;</i>	
<i>José Luis Cárdenas-López y Cristina Molina Rosell</i>	

Capítulo 16	
Composición, propiedades	
y usos del mezquite en la industria alimentaria	463
<i>Rey David Vargas-Sánchez; Brisa del Mar Torres-Martínez;</i>	
<i>Gastón Ramón Torrescano-Urrutia; María de los Ángeles de</i>	
<i>la Rosa-Alcaraz y Armida Sánchez-Escalante</i>	

Capítulo 17	
La goma exudada del mezquite (<i>Prosopis</i> spp.)	
como estabilizador de helados lácteos	489
<i>Ofelia Rouzaud Sández; Adrián Gilberto Encinas Cárdenas;</i>	
<i>Rosario Maribel Robles Sánchez; Francisco Rodríguez Félix</i>	
<i>y Reyna Luz Vidal Quintanar</i>	

Capítulo 18	
Plantas de zonas áridas, fuente de aditivos	
para la conservación de la carne y productos cárnicos	525
<i>Rey David Vargas-Sánchez; Armida Sánchez-Escalante;</i>	
<i>Brisa del Mar Torres-Martínez; María de los Ángeles de</i>	
<i>la Rosa-Alcaraz y Gastón Ramón Torrescano-Urrutia</i>	

SECCIÓN III
SALUD

Capítulo 19

Bebidas fermentadas tradicionales mexicanas
de las zonas áridas de México 553

*Karina Robledo-Márquez; Victoria Ramírez;
Aaron Fernando González-Córdova; Yadira Ramírez-Rodríguez
y Luis García-Ortega L., Joyce Trujillo*

Capítulo 20

Compuestos bioactivos en cactáceas
como una fuente de alimentos funcionales. 583

*Janet María León-Morales; Soledad García-Morales;
Diana María Amaya-Cruz y Aleyda Pérez Herrera*

Capítulo 21

Panorama epidemiológico de las enfermedades
crónico-degenerativas e importancia del conocimiento
local y tradicional de las comunidades de zonas áridas. 617

*Antonio Rico; Yadira Ramírez; Natalia Martínez-Tagüeña;
Omar Casanova y Joyce Trujillo*

Capítulo 22

Plantas de zonas áridas y su relación con la diabetes mellitus . . . 653

Alethia Muñiz-Ramírez y Abraham Heriberto García Campoy

Capítulo 23

Propiedades farmacológicas de compuestos bioactivos
obtenidos de subproductos industriales de dátil 679

*María de los Ángeles de la Rosa-Alcaraz; Gastón Ramón
Torrescano-Urrutia; Rey David Vargas-Sánchez;
Brisa del Mar Torres Martínez y Armida Sánchez-Escalante.*

INTRODUCCIÓN

JOEL DAVID FLORES RIVAS¹
NATALIA MARTÍNEZ TAGÜEÑA²
ALETHIA MUÑIZ RAMÍREZ³
JOYCE TRUJILLO SILVA³

Este libro fue elaborado por una iniciativa del Consorcio de Investigación, Innovación y Desarrollo para las Zonas Áridas (CIIDZA) desarrollado por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipicyt), y conformado además por El Colegio de San Luis, A.C. (Col-san), el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (Ciatej), el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), el Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste (Cibnor) y el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Aunque el día de hoy el consorcio ya no está activo, su objetivo principal fue generar investigación inter, multi y transdisciplinaria, basada en la inclusión justa de las comunidades locales para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales de las zonas áridas del país, generando innovación de alto valor agregado, alineado con las demandas del mercado y de beneficio social en los sectores farmacéutico, químico, cosmético, médico y alimenticio, entre otros.

¹ IPICYT - División de Ciencias Ambientales. Camino a la Presa San José 2055. Col. Lomas 4.a sección. C. P. 78216. San Luis Potosí, S.L.P., México.

² CONACYT-IPICYT, División de Ciencias Ambientales. Camino a la Presa San José 2055. Col. Lomas 4.a sección. C. P. 78216. San Luis Potosí, S.L.P., México.

³ CONACYT-IPICYT, División de Materiales Avanzados. Camino a la Presa San José 2055. Col. Lomas 4.a sección. C. P. 78216. San Luis Potosí, S.L.P., México.

En el consorcio se desarrollaron estrategias competitivas con base a criterios internacionales para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales de las zonas áridas y semiáridas del país. Se participó en la formación de recursos humanos de alto nivel y se realizaron actividades de divulgación y de vinculación para contribuir al aprovechamiento sostenible de los recursos naturales de las zonas áridas y semiáridas, que incida a largo plazo en los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la ONU, como el presente libro. El aprovechamiento sostenible de los recursos naturales implica su uso respetando la integridad funcional y las capacidades de carga de los ecosistemas de los que forman parte dichos recursos. Por ende, permite, posibilita o promueve directamente la recuperación de los recursos naturales, garantizando la renovación y permanencia a largo plazo (Kumar *et al.*, 2021). Además, también a largo plazo, busca incidir en los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por las Naciones Unidas (ONU, 2015).

En las páginas de este libro editado encontrarán que los distintos autores emplean los términos "sostenibilidad" y "sustentabilidad". La elección es una cuestión de preferencia personal o regional y no cambia significativamente el concepto subyacente. Ambos términos apuntan a la importancia de equilibrar el desarrollo humano con la preservación del medio ambiente y la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras. Lo más importante es comprender y promover los principios de la sostenibilidad, sin importar cuál de los dos términos se utilicen en convenciones lingüísticas locales.

Los diecisiete objetivos de desarrollo sostenible (ODS) fueron aprobados como parte de la Agenda 2030, como un llamado universal a la acción para poner fin a la pobreza, mejorar la vida y proteger el planeta. El desarrollo sostenible satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades. También busca construir un futuro inclusivo, sostenible y resiliente para las personas y el planeta, armonizando el crecimiento económico equitativo, la inclusión social y la protección del medio ambiente. Estos elementos están interrelacionados y son todos esenciales para el bienestar humano (ONU, 2015). El presente libro aborda diversos ODS, como los 1, 2, 9, 12, 13, 15 y 17, pero particularmente incide en el ODS 3, que trata sobre la salud y el bienestar.

Recientemente surgen los conceptos de salud planetaria, una salud y ecosalud, desarrollados desde múltiples disciplinas y apoyados por instituciones internacionales para entender que la salud humana está totalmente vinculada a la salud de la Tierra (UNCC, s.f.). Sabemos que todas las partes que conforman al planeta Tierra (nosotros incluidos) estamos interconectadas por diversas dinámicas en constante cambio. El calentamiento global, la pérdida de biodiversidad, el colapso de las pesquerías, la escasez de agua y la contaminación aumentan la exposición a enfermedades infecciosas y a procesos como estrés, toxinas y malos hábitos alimenticios. También generan pérdida de plantas, animales, alimentos, medicinas, lenguajes, tradiciones, historias, sistemas de valor, propósito, paz, espiritualidad, compasión y optimismo (Haines, 2017; Myers, 2017; Redvers *et al.*, 2020; Talukder *et al.*, 2022). Con la pandemia de Covid-19 nos dimos cuenta de lo vulnerables que somos y que requerimos entender la conectividad del planeta para responder a estos retos y oportunidades de manera colectiva y organizada para el cuidado de la salud.

La salud planetaria depende en gran medida de la producción de alimentos, de qué se consume, y de cuánto se pierde y desecha (Myers, 2017). Urge una transformación radical de los sistemas de producción de alimentos; su intensificación debe ser sostenible reduciendo la tierra empleada, eficientando el uso de agua, mejorando los fertilizantes reciclando el fósforo, desarrollando la mitigación al cambio climático y fomentando la diversidad (Loken *et al.*, 2021). También existen sistemas de producción de alimento sostenibles a menor escala donde se promueve el consumo local de alimentos. Estos sistemas minimizan el uso de agua, plaguicidas y fertilizantes, mientras promueven la diversidad cultural y biológica, y por ende, la nutrición y la salud (Fanzo, 2017). Mejorar la dieta es un gran comienzo para lograr un balance físico, emocional y social construyendo hábitos más saludables. Es necesario aumentar el consumo de frutas, verduras, nueces y legumbres (de preferencia locales y de la estación) mientras se disminuye el consumo de carne roja y azúcar. Además, se deben encontrar estrategias para mitigar el acceso y consumo desigual que existe entre la población (Willett *et al.*, 2019).

En los diversos capítulos de este libro se presentan ideas innovadoras que aluden a estos conceptos. Los lectores encontrarán ciencia y tecnología que contribuye al fin de la pobreza, mejora la salud y el bienestar,

disminuye el hambre y mejora la alimentación incentivando la producción y el consumo responsable; promueve la industria con beneficio socioambiental y realza la importancia de las alianzas entre distintos sectores, mientras protege toda la vida en el planeta Tierra. En particular, en las zonas semiáridas y áridas de México, que presentan una gran oportunidad para desarrollar soluciones de crecimiento económico equitativo con inclusión social siguiendo las normas y leyes correspondientes, siempre con el cuidado socioambiental. Así, la academia debe colaborar con los pobladores locales que cuentan con un amplio conocimiento tradicional por medio de diversos marcos legales y éticos, como el Protocolo de Nagoya, el cual es un tratado internacional que establece el consentimiento previo e informado con la participación justa y equitativa en los beneficios derivados de la utilización de los recursos genéticos (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2011). Para así, juntos elaborar proyectos alineados con las normas, leyes e instituciones regulatorias estableciendo colaboraciones con la industria que tiene los fondos y la infraestructura necesarios para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.

En las zonas semiáridas y áridas de México el clima es extremo e impredecible generando una diversidad biológica y cultural excepcional (basado en Safriel *et al.*, 2005). Muchos de sus organismos son endémicos, es decir, que solo se encuentran en esos lugares y esta riqueza de organismos se ve favorecida por la variedad de ambientes desérticos (Hernández, 2006). En México, los principales zonas áridas y semiáridas son el desierto Sonorense, el desierto Chihuahuense, la región semiárida Queretano-hidalguense y la región semiárida Poblano-oaxaqueña (Miranda, 1955), las cuales presentan un clima caliente y seco con una precipitación anual menor a 500 mm (Rzedowski, 1973). Sin embargo, existen regiones que presentan un clima caliente seco y semiseco, con una precipitación anual de hasta 900 mm y una vegetación fisonómicamente similar a las asociaciones vegetales con menor precipitación del bosque tropical seco, como las regiones Tamaulipeca, Guerrerense, Tehuantepeca, Veracruzana y Yucateca (Rzedowski, 1978).

La vegetación principal de los desiertos mexicanos está conformada básicamente por diferentes tipos de matorral conocidos como matorral xerófilo, además de mezquital, chaparral (encinares arbustivos) y piñonar (pinos piñoneros) (Rzedowski, 1978). Las especies de plantas

y animales presentes en estos tipos de vegetación desértica poseen adaptaciones especiales para tolerar las condiciones de estrés en las que viven (Hernández, 2006; Ward, 2009). Tales adaptaciones permiten que estos desiertos posean una alta riqueza de especies; por ejemplo, los desiertos mexicanos tienen aproximadamente 6 000 especies de plantas (Inegi, 2008). El Desierto Chihuahuense es el de mayor tamaño y mayor riqueza de especies (Henrickson y Johnston, 2007; Mittermeier *et al.*, 2002), le siguen el Desierto Sonorense (Hernández, 2006) y el Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Romero, 2018; Zarazúa-Carbajal *et al.*, 2020).

Las zonas áridas son muy antiguas, y sus pobladores, durante milenios, se han adaptado al patrón espacial y temporal de la disponibilidad de los recursos naturales escasos y a veces abundantes (Stafford-Smith *et al.*, 2009). El Valle de Tehuacán-Cuicatlán es considerado clave para el origen y desarrollo de la agricultura en Mesoamérica, en donde se domesticaron el chile (*Capsicum annuum*; Pickersgill, 2017), el maíz (*Zea mays*), la calabaza (*Cucurbita* sp.) y el frijol (*Phaseolus vulgaris* (Torres-Rodríguez *et al.*, 2018). Previo a la domesticación de estos cultivos, el agave era la principal fuente de carbohidratos en los desiertos mexicanos (Torres-García *et al.*, 2019). Tanto en el pasado como en la actualidad, en los desiertos mexicanos existe una gran cantidad de plantas y animales (principalmente insectos) silvestres a los cuales sus pobladores les dan usos variados como alimentos, bebidas, medicinas y fibras. Sus pobladores cuentan con un amplio conocimiento etnobotánico ancestral y tradicional que promueve un estilo de vida saludable mediante el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales (Martínez-Ballesté *et al.*, 2020).

Las plantas de los desiertos son populares como alimento desde épocas prehispánicas y hasta nuestros días, lo que favorece una disponibilidad de productos frescos para su consumo y opciones de alimentos con valor agregado como opciones biológicas y biotecnológicas para la producción de alimentos nutricionales óptimos, así como bebidas alcohólicas con propiedades sensoriales importantes y con mayor producción sostenible que beneficia la salud de los pequeños agricultores. Entre las especies de plantas más importantes como alimentos o bebidas se encuentran el mezquite (*Prosopis* spp.), el nopal como fruto (tunas) y como verdura (*Opuntia* spp.), las pitahayas (*Stenocereus* spp.), la pitahaya (*Hylocereus* spp.), las pereskias (*Pereskia* spp.), el garambullo

(*Myrtillocactus geometrizans*), el chiltepín o chile piquín (*C. annuum* var. *glabriusculum*), el orégano (*Lippia graveolens*), el agave (*Agave* spp.) y el sotol (*Dasyrillion* spp.), entre otros. Sobre estos recursos, ya se conocen su distribución territorial, uso y consumo tradicional y actual, su composición y sus propiedades sensoriales y funcionales (Corzo-Ríos *et al.*, 2016; Herrera *et al.*, 2014; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2020).

Además, tanto éstas como muchas especies más son fuente potencial de compuestos con actividad biológica o biotecnológica con usos en las industrias alimentaria y farmacéutica, principalmente, como exudados, gomas, resinas, látex, almidón, granos, proteínas, ácidos grasos polinsaturados, vitaminas, minerales, tocoferoles y compuestos fitoquímicos. Dentro de estos usos, se destaca su empleo en la elaboración de pan mediante masas congeladas, elaboración de cárnicos, helados, botanas, además de la elaboración de bebidas alcohólicas como bacanora, sotol, mezcal y tequila (García-Mendoza, 2012; López-Romero *et al.*, 2018). Otros compuestos tienen la finalidad de ser empleados como aditivo, espumante, emulsionante, encapsulante, estabilizante, gelificante, formador de películas y fuentes para la destilación de bebidas, entre otros usos. Así, las plantas de los desiertos mexicanos poseen una amplia gama de aplicaciones industriales principalmente en alimentos, bebidas y farmacia, pero también en industrias como la textil y automotriz, como es el caso del nopal recientemente (Aké-Madera, 2014; Cano *et al.*, 2019; ClusteritMx, 2019).

Cabe destacar que los diferentes usos aprovechables que nos ofrecen las plantas desérticas provienen de todas sus partes, como los tallos, las raíces, rizomas o bulbos, hojas, frutos, semillas y flores. Y tienen usos potenciales del material de desecho, como las cáscaras, que pueden ser empleadas como fuente de biomasa o fuente de compuestos bioactivos (Corzo-Ríos *et al.*, 2016; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2020). El empleo de biopolímeros con aplicaciones innovadoras en las industrias alimentarias y farmacéuticas es también muy importante para las plantas desérticas mexicanas. Por ejemplo, con el desarrollo de empaques para alimentos y de microencapsulamientos para fármacos. Por tanto, se cuentan con suficientes perspectivas en un futuro sobre el aprovechamiento sostenible con el desarrollo tecnológico de estos recursos naturales (Aké-Madera, 2014; Gheribi y Khwaldia, 2019).

En la actualidad, la presión demográfica, el cambio climático, la

contaminación ambiental, la pérdida de la biodiversidad, la erosión del suelo y el agotamiento del agua son factores que amenazan la sostenibilidad de la agricultura y, por ende, la seguridad alimentaria en las zonas semiáridas y áridas del país (Hiwale, 2015). Por tanto, es muy importante promover la salud planetaria que conlleva una buena alimentación con recursos silvestres locales, y la inocuidad y seguridad agroalimentaria considerando prácticas adecuadas en los ambientes agrícolas y de manufactura. Para esto, se deben tomar en cuenta tanto los diferentes riesgos de contaminación que se presentan en la cadena agroalimentaria como la normativa y certificaciones que respaldan la producción de algunos de los alimentos y a los sistemas de gestión de la inocuidad.

Aunado al amplio uso descrito sobre plantas, en los desiertos mexicanos encontramos diversos insectos como alimento que han sido planteados como esenciales para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible (Moruzzo *et al.*, 2021) y han incitado diversos estudios sobre su potencial aprovechamiento agroindustrial, pecuario, nutracéutico, farmacológico y cosmético (*i.e.* Almeida *et al.*, 2022; Costa-Neto, 2005; Dossey *et al.*, 2016). El uso medicinal de los insectos y de las sustancias extraídas de ellos destaca a lo largo del mundo con sus propiedades inmunológicas, analgésicas, antibacteriales, diuréticas, anestéticas y antireumáticas (Costa-Neto, 2005). En los desiertos mexicanos, el conocimiento de la medicina tradicional, adquirido desde épocas prehispánicas y que se sigue usando hasta nuestros días, ha sido empleado en estudios de ciencia básica y estudios clínicos, recientemente regulado por diversos marcos legales y éticos, como el Protocolo de Nagoya, previamente mencionado.

Desde la época prehispánica, los pobladores de los desiertos mexicanos han utilizado diversas especies de plantas para tratar ciertas enfermedades o padecimientos (Martínez-Ballesté *et al.*, 2020; Estrada-Castillón *et al.*, 2021). De ciertas especies, investigaciones científicas han estudiado la eficacia terapéutica de estas plantas (Skouta *et al.*, 2018). La medicina tradicional, transmitida de generación en generación, es una herencia de nuestros antepasados para recuperar la salud (Martínez-Ballesté *et al.*, 2020). En los últimos años, la medicina tradicional ha tomado gran relevancia, por lo que la Organización Mundial de la Salud destaca la importancia de su estudio y prevalencia (WHO, 2004). Cabe mencionar que existen diversas bebidas fermentadas tradicionales de

nuestro país, las cuales se han consumido desde tiempos prehispánicos y hasta nuestros días. A estas bebidas se les han atribuido diferentes efectos medicinales benéficos para la salud debido a la presencia de minerales, vitaminas, antioxidantes y polifenoles, entre otros (Tovar *et al.*, 2008).

En la actualidad, las plantas medicinales siguen siendo la primera alternativa de muchas personas para combatir diversas enfermedades o padecimientos, debido a que son menos costosas y más accesibles que un tratamiento biomédico (Jacobo-Herrera *et al.*, 2016). Muchas plantas del desierto adaptadas a las condiciones de aridez producen metabolitos secundarios con diversas propiedades medicinales, por ejemplo, *Phoenix dactylifera*, *Opuntia* spp., *Hylocereus* spp., *Stenocereus* spp., *Lophophora williamsii*, *Ibervillea sonora*, *Parkinsonia aculeata* y *Psacalium decompositum*, entre muchas otras. Las actividades biológicas que presentan sus metabolitos secundarios pueden ser coadyuvantes en el tratamiento de diferentes padecimientos (Castellanos-Jiménez *et al.*, 2022; Sharma *et al.*, 2017). Además, se ha elucidado la estructura química de algunos compuestos que le confieren a estas plantas su actividad benéfica, lo que expone el gran potencial medicinal que estas especies pueden ofrecer.

Esperamos que este libro evidencie y promueva la importancia de unir esfuerzos institucionales como el caso de los consorcios de investigación, innovación y desarrollo, resaltando la necesidad de continuar realizando investigación inter, multi y transdisciplinaria basada en la inclusión justa de las comunidades locales para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales de las zonas áridas del país, generando innovación de beneficio social en los sectores farmacéutico, químico, cosmético, médico y alimenticio, entre otros.

REFERENCIAS

- AKÉ-MADERA, M. (2014). *Nopal, fuente excepcional de energía renovable limpia y sustentable: el oro verde de México; el santo grial de las energías renovables*. Zitácuaro, Mich., México: Editorial del Magisterio.
- ALMEIDA, C., Murta, D., Nunes, R., Baby, A. R., Fernandes, Â., Barros, L., y Rosado, C. (2022). "Characterization of lipid extracts from

- the *Hermetia illucens* larvae and their bioactivities for potential use as pharmaceutical and cosmetic ingredients”, *Heliyon*, 8(5), e09455.
- CANO, H., González, V., de Gortari, E., Nepote, A. C., Landavazo, M. A., Villaseñor, L. M., Arteaga, J. C., y León de León, C. (2019). “Textil elaborado con nopal”, *Revista Saber Más*, 48.
- CASTELLANOS-JIMÉNEZ, Reynoso-Camacho, A. K., R., Rocha-Guzmán, N. E., Corella-Madueño, M. A., de los Ríos, E. A., y Salgado, L. M. (2022). “Effect of herbal decoctions used in Mexican traditional medicine attenuate the adverse effects of a hypercaloric diet”, *Phytomedicine Plus*, 2(1), 100213.
- ClusteritMx (2019). “Cluster nacional de innovación y desarrollo tecnológico”. <https://www.clusterit.mx/single-post/2019/12/09/piel-de-nopal-para-la-industria-textil>.
- CORZO-RÍOS, L., Bautista-Ramírez, M., Gómez, Y., y Torres-Bustillos, L. (2016). “Frutas de cactáceas: compuestos bioactivos y sus propiedades nutraceuticas”, en M. E. Ramírez-Ortiz (ed.), *Propiedades funcionales de hoy*. México: OmniaScience, 35-66.
- COSTA-NETO, E. M. (2005). “Entomotherapy, or the medicinal use of insects”, *Journal of Ethnobiology*, 25(1), 93-114.
- DOSSEY, A. T., Morales-Ramos, J. A., y Guadalupe Rojas, M. (2016). *Insects as sustainable food ingredients: production, processing and food applications*. Nueva York: Academic Press.
- ESTRADA-CASTILLÓN, E., Villarreal-Quintanilla, J. Á., Encina-Domínguez, J. A., Jurado-Ybarra, E., Cuéllar-Rodríguez, L. G., Garza-Zambrano, P., y Gutiérrez-Santillán, T. V. (2021). “Ethnobotanical biocultural diversity by rural communities in the Cuatrociénegas Valley, Coahuila; Mexico”, *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 17(21).
- FANZO, J. (2017). “From big to small: the significance of smallholder farms in the global food system”, *The Lancet Planetary Health*, 1(1), e15-e16.
- GARCÍA-MENDOZA, A. J. (2012). “México, país de magueyes”, *La Jornada del campo*, suplemento del diario *La Jornada* (México), 18 de febrero, p. 4. <https://www.jornada.com.mx/2012/02/18/cam-pais.html>.
- GHERIBI, R., y Khwaldia, K. (2019). “Cactus mucilage for food packaging applications”, *Coatings*, 9, 655.

- HAINES, A. (2017). “Addressing challenges to human health in the Anthropocene epoch –an overview of the findings of the Rockefeller/Lancet Commission on Planetary Health”, *International Health*, 9(5), 269-271.
- HENRICKSON, J., y Johnston, M. C. (2007) *A flora of the Chihuahuan Desert region*. Los Ángeles, Cal.: J. Henrickson.
- HERNÁNDEZ, H. M. (2006). *La vida en los desiertos mexicanos*. México: Fondo de Cultura Económica (La Ciencia Para Todos 213).
- HERRERA, F., Betancur, D., y Segura, M. (2014). “Compuestos bioactivos de la dieta con potencial en la prevención de patologías relacionadas con sobrepeso y obesidad; péptidos biológicamente activos”, *Nutrición Hospitalaria*, 29(1), 10-20.
- HIWALE, S. (2015). *Sustainable horticulture in semiarid dry lands*. Vejalpur, Gujarat, India: Springer.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2008). “Área de capacitación, regiones naturales y biogeografía de México”. <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/regionesnaturalesbiogeografiademexico.pdf>.
- JACOBO-HERRERA, N. J., Jacobo-Herrera, F. E., Zentella-Dehesa, A., Andrade-Cetto, A., Heinrich, M., y Pérez-Plasencia, C. (2016). “Medicinal plants used in Mexican traditional medicine for the treatment of colorectal cancer”, *Journal of Ethnopharmacology*, 179, 391-402.
- KUMAR, A., Kumar, S., Ramchiary, N., y Singh, P. (2021). “Role of traditional ethnobotanical knowledge and indigenous communities in achieving sustainable development goals”, *Sustainability*, 13(6), 3062.
- LOKEN, B., Willett, W., y Rockström, J. (2021). “Food, planet, health: healthy and sustainable diets for 10 billion people”, en J. H. Dash (ed.), *World scientific encyclopedia of climate change: case studies of climate risk, action, and opportunity*, vol. 2. Nueva Jersey: World Scientific Pub Co Inc., 107-117.
- LÓPEZ-ROMERO, J. C., Ayala-Zavala, J. F., González-Aguilar, G. A., Peña-Ramos, E. A., y González-Ríos, H. (2018). “Biological activities of Agave by-products and their possible applications in food

- and pharmaceuticals”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(7), 2461-2474.
- MARTÍNEZ-BALLESTÉ, A., Iglesias Chacón, T., y Mandujano, M. C. (2020). “Between the arid and the opulent: plant resources of the Mexican desert”, en M. C. Mandujano, I. Pisanti y L. Eguiarte, *Plant diversity and ecology in the Chihuahuan Desert*. Springer, Cham, 109-115.
- MIRANDA, F. (1955). “Formas de vida vegetales y el problema de la delimitación de las zonas áridas de México”, en *Mesas redondas sobre problemas de las zonas áridas de México*. México: IMRNR, 85-119.
- MITTERMEIER, R. A., Mittermeier, C. G., Robles-Gil, P., Pilgrim, J., da Fonseca, G. A. B., Brooks, T., y Konstant, W. R. (eds.) (2002). *Wilderness: Earth’s last wild places*. México: Cemex.
- MORUZZO, R., Mancini, S., y Guidi, A. (2021). “Edible insects and sustainable development goals”, *Insects*, 12(6), 557.
- MYERS, S. (2017). “Planetary health: protecting human health on a rapidly changing planet”, *The Lancet*, 390(10114), 2860-2868.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas) (2015). “Objetivos de desarrollo sostenible. Agenda de desarrollo sostenible 2030”. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- PICKERSGILL, B. (2017). “The domestication of chili peppers”, en P. J. Ukko y G. W. Dumbleby (eds.), *The domestication and exploitation of plants and animals*. Nueva York: Routledge, 443-450.
- RAMÍREZ-RODRÍGUEZ, Y., Martínez-Huélamo, M., Pedraza-Chaverri, J., Ramírez, V., Martínez-Tagüeña, N., y Trujillo, J. (2020). “Ethnobotanical, nutritional and medicinal properties of Mexican drylands Cactaceae fruits: recent findings and research opportunities”, *Food Chemistry*, 312, 126073.
- REDVERS, N., Poelina, A., Schultz, C., Kobei, D. M., Githaiga, C., Perdrisat, M., Prince, D., y Blondin, B. S. (2020). “Indigenous natural and first law in planetary health”, *Challenges*, 11, 29.
- ROMERO, L. (2018). “Inventario de la riqueza del Valle de Tehuacán-Cuicatlán”, *Gaceta UNAM*, 5, 221.
- RZEDOWSKI, J. (1978). *Vegetación de México*. México: Limusa.

- RZEDOWSKI, J. (1973). "Geographical relationships of the flora of Mexican dry regions", en A. Graham (ed.), *Vegetation and vegetational history of northern Latin America*. Ámsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co, 61-72.
- SAFRIEL, U., Adeel, Z., Niemeijer, D., Puigdefabregas, J., White, R., Lal, R., Winslow, M., Ziedler, J., Prince, S., Archer, E., King, C., Shapiro, B., Wessels, K., Nielsen, T. T., Portnov, B., Reshef, I., Thornell, J., Lachman, E., y McNab, D. (2005). "Dryland systems", en R. Hassan, R. Scholes y N. Ash (eds.), *Ecosystems and human well-being: current state and trends. Findings of the condition and trends working group. Millennium ecosystem assessment*. Washington: Island Press, 623-662.
- Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica (2011). *Protocolo de Nagoya sobre acceso a los recursos genéticos y participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de su utilización al convenio sobre la diversidad biológica*. Montreal: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- SHARMA, A., Flores-Vallejo, R. del C., Cardoso-Taketa, A., y Villarreal, M. L. (2017). "Antibacterial activities of medicinal plants used in Mexican traditional medicine", *Journal of Ethnopharmacology*, 208, 264-329.
- SKOUTA, R., Morán-Santibáñez, K., Valenzuela, C. A., Vásquez, A. H., y Felon, K. (2018). "Assessing the antioxidant properties of *Larrea tridentata* extract as a potential molecular therapy against oxidative stress", *Molecules*, 23(7), 1826.
- STAFFORD-SMITH, D. M., Abel, N., Walker, B., y Stuart, F. S. (2009). "Drylands: coping with uncertainty, thresholds, and changes in state", en F. S. Chapin III, G. P. Kofinas y C. Folke C. (eds.), *Principles of ecosystem stewardship*. Nueva York: Springer, 171- 195.
- TALUKDER, B., Ganguli, N., Matthew, R., Hipel, K. W., y Orbinski, J. (2022). "Climate change-accelerated ocean biodiversity loss & associated planetary health impacts", *Journal of Climate Change and Health*, 6, 100114.

- TORRES-GARCÍA, I., Rendón-Sandoval, F. J., Blancas, J., Casas, A., y Moreno-Calles, A. I. (2019). “The genus *Agave* in agroforestry systems of Mexico”, *Botanical Sciences*, 97(3), 263-290. Doi: 10.17129/botsci.2202.
- TORRES-RODRÍGUEZ, E., Vallebuena-Estrada, M., González, J. M., Cook, A. G., Montiel, R. y Vielle-Calzada, J. P. (2018). “AMS dates of new maize specimens found in rock shelters of the Tehuacán Valley”, *Radiocarbon*, 60, 975-987.
- TOVAR, L. R., Olivos, M., y Gutiérrez, M. E. (2008). “Pulque, an alcoholic drink from rural Mexico, contains phytase. Its in vitro effects on corn tortilla”, *Plant Foods for Human Nutrition*, 63(4), 189-194. <https://doi.org/10.1007/S11130-008-0089-5/TABLES/3>.
- UNCC (United Nations Climate Change) (s.f.). “Planetary health”. <https://unfccc.int/climate-action/un-global-climate-action-awards/planetary-health>.
- WARD, D. (2009). *The biology of deserts*. Oxford: Oxford University Press.
- WILLETT, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., y Murray, C. J. (2019). “Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems”, *The Lancet*, 393(10170), 447-492.
- WHO (World Health Organization) (2004). “Global atlas of traditional medicine: proceedings of an international meeting, (2003-6-17)”. Kobe, Japón: WHO.
- ZARAZÚA-CARBAJAL, M., Chávez-Gutiérrez, M., Romero-Bautista, Y., Rangel-Landa, S., Moreno-Calles, A. I., Ramos, L. F. A., Smith, S. E., Blancas, J., del Val, E., Arizmendi, M. C., y Casas, A. (2020). “Use and management of wild fauna by people of the Tehuacán-Cuicatlán Valley and surrounding areas, Mexico”, *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 16, 4.

SECCIÓN I
Diversidad y aprovechamiento
de recursos naturales

CAPÍTULO 1

BIODIVERSIDAD Y ECOLOGÍA DE LOS DESIERTOS MEXICANOS

ALFREDO RAMÍREZ-HERNÁNDEZ¹

JOEL DAVID FLORES RIVAS²

RESUMEN

Contrario a lo que se podría pensar, los desiertos mantienen una vasta diversidad biológica de la cual depende también una amplia diversidad cultural asociada a estos ambientes. En este capítulo se pone de manifiesto la importancia de los desiertos mexicanos desde un contexto ecológico que permita entender los factores ambientales que han modelado la diversidad de especies. El objetivo es exponer la importancia de los desiertos como reservorio de biodiversidad y como un sistema complejo. Asimismo, entender que la dinámica de los desiertos permitirá un uso sostenible de los recursos que éstos ofrecen al ser humano, tema central de este libro.

PALABRAS CLAVE: adaptación, aridez, desiertos, interacciones.

¹ CONAHCYT / Ipcyt - División de Ciencias Ambientales. Camino a la Presa San José 2055. Col. Lomas 4^a. sección. C.P. 78216. San Luis Potosí, S.L.P., México.

² Ipcyt - División de Ciencias Ambientales. Camino a la Presa San José 2055. Col. Lomas 4^a. sección. C. P. 78216. San Luis Potosí, S.L.P., México. Autor para la correspondencia: joel@ipicyt.edu.mx.

INTRODUCCIÓN

Las tierras secas cubren un tercio de la superficie de nuestro planeta. Las principales características que las definen se deben a que la pérdida de agua por evaporación es mucho mayor que la precipitación; las temperaturas son extremas, lo cual ocasiona que el día sea muy caluroso y la noche muy fría; además, los suelos suelen tener pocos nutrientes (Granados-Sánchez *et al.*, 2012). Las tierras secas se pueden catalogar como zonas hiperáridas, áridas y semiáridas, hasta zonas secas subhúmedas, dependiendo de la precipitación media anual y el índice de aridez (Aronson *et al.*, 2002). Las tierras secas más extendidas sobre la faz de la tierra y, por tanto, mejor conocidas, son las zonas áridas y semiáridas, y seguramente sus máximos representantes en los que todos pensamos en primer lugar son los desiertos.

Debido a sus características, no es de extrañar que pensemos en los desiertos como zonas inhóspitas. Las presiones abióticas, principalmente el limitado acceso de agua, han sido los factores determinantes para modelar el dinamismo de la biodiversidad que habita en estos ambientes (McCluney *et al.*, 2012; McCluney y Sabo, 2009). Estos ecosistemas son de gran relevancia ya que mantienen una importante diversidad cultural y biológica, siendo el sustento de más del 40% de la población humana mundial; el 90% de la cual vive en países en desarrollo y su principal sustento es mediante la agricultura de secano o de regadío, o bien, mediante el pastoreo generalizado (United Nations Environment Management Group, 2011).

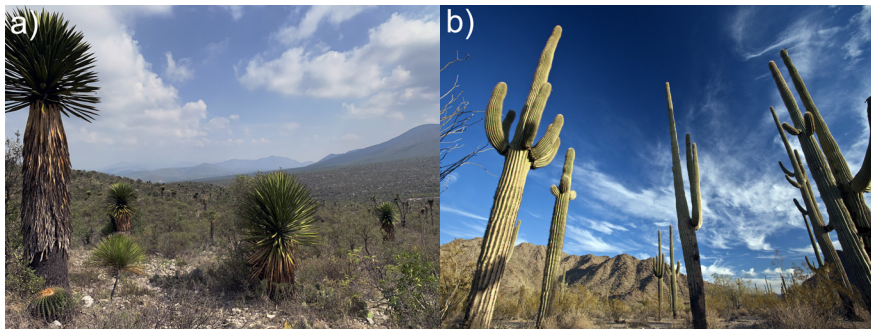
En definitiva, el ser humano ha logrado hacer uso de los recursos naturales que estos ecosistemas ofrecen. Sin embargo, en la actualidad los desiertos se ven amenazados por la expansión de la frontera agraria y la sobreexplotación de recursos naturales con la finalidad de satisfacer una población creciente que demanda un gran consumo de alimentos (Delgado *et al.*, 2001). Las proyecciones futuras advierten que la demanda de alimentos aumentará en 2050 y, por tanto, aumentará la tierra destinada a estas actividades (FAO, 2017). Aunado a lo anterior, la degradación severa de la tierra por aridez y sobreexplotación de los recursos naturales se estima que afecte directamente a unos 250 millones de personas en el mundo en desarrollo; una estimación que quizá aumentará de manera

sustancial ante el cambio climático y el crecimiento de la población (Reynolds *et al.*, 2007). Por tanto, es preciso generar conocimiento integrador que permita conocer las complejas dinámicas ecológicas que se entretienen en los desiertos, con la finalidad de poder proponer estrategias sustentables para un uso equilibrado de los recursos naturales. En este capítulo abordamos generalidades de los desiertos y las principales adaptaciones de la biodiversidad ante las extremas condiciones ambientales que caracterizan estos ecosistemas.

¿QUÉ SON LOS DESIERTOS?

Contrario a la idea que tiene mucha gente sobre los desiertos, que son terrenos inhóspitos e improductivos en donde la escasa lluvia no permite la supervivencia de organismos vivos, los desiertos mexicanos son en realidad sistemas ecológicos complejos, ricos en organismos, muchos de ellos endémicos, es decir, sólo se encuentran en esos lugares (Hernández, 2006). La riqueza de organismos se ve favorecida por la variedad de ambientes áridos, que van desde los típicos que son influidos por la franja mundial de zonas áridas, como los desiertos chihuahuense y sonorense (figura 1); aquellas regiones que están influidas por las franjas tropicales, como las regiones áridas poblana, guerrerense, tehuantepeca y yucateca; hasta una región árida fría en las llanuras de Perote (Granados-Sánchez *et al.*, 2012).

FIGURA 1



Paisajes típicos de la vegetación de dos de los desiertos de mayor extensión en México:

- a) Desierto Chihuahuense (Fuente: Foto de Alfredo Ramírez-Hernández);
- b) Desierto Sonorense (Fuente: Foto de Creative Commons, dominio público).

También es importante mencionar que los organismos de estos ecosistemas interactúan entre sí y con su medio físico; por ejemplo, existen muchas interacciones entre plantas, entre plantas y animales, entre plantas y microorganismos del suelo, etc. (Ward, 2009). Un ejemplo de interacciones entre plantas son las que se dan entre plantas nodrizas y plantas protegidas; a las primeras se les llama así porque bajo su copa se crea un microambiente especial para la germinación y el establecimiento de las segundas (Flores y Jurado, 2003). Ejemplos de plantas nodriza son los mezquites (*Prosopis* spp.; Muro-Pérez *et al.*, 2012; Pérez-Sánchez *et al.*, 2015), las acacias o huizaches (*Vachellia* spp.; Zúñiga *et al.*, 2005), la gobernadora (*Larrea tridentata*; Badano *et al.*, 2016; Zúñiga *et al.*, 2005) e inclusive plantas de porte más pequeño como la bromelia terrestre *Hechtia glomerata* (López-Flores *et al.*, 2018). Las especies protegidas se benefician de las nodrizas, sobre todo en etapas iniciales de sus ciclos de vida, como la germinación de semillas y el establecimiento de plántulas; gran cantidad de especies de la familia Cactaceae se benefician de las plantas nodriza en estas etapas (Flores y Jurado, 2003).

Como ejemplo de interacción entre plantas y animales están las especies de insectos polinizadores de cactáceas (Clark-Tapia y Molina-Freaner, 2004) y murciélagos polinizadores de agaves (Arizaga *et al.*, 2000). Por otra parte, diversas especies de plantas desérticas incrementan su crecimiento por efecto de microorganismos; por ejemplo, algunas bacterias promueven el crecimiento de plántulas de cardón (*Pachycereus pringlei*) en Baja California Sur (Puente *et al.*, 2009). Así, en los desiertos se encuentra una alta riqueza de especies, los cuales presentan adaptaciones específicas y únicas para tolerar el estrés ocasionado por la alta radiación solar, las bajas precipitaciones y las temperaturas extremas (Hernández, 2006; Ward, 2009).

Mientras el entorno abiótico define los desiertos e impone una fuerte presión de selección sobre los organismos que viven allí, las interacciones bióticas entre los organismos en los desiertos no son menos importantes que los de otros entornos o ecosistemas (Hernández, 2006). De hecho, es la relativa simplicidad de los ecosistemas desérticos la que los hace más manejables para el estudio que otros ambientes de mayor complejidad. Además, las innumerables formas en que los organismos explotan las enormes variaciones espaciales y temporales de los desiertos llevan a la creación de ensamblajes únicos con una sorprendente megadiversidad (Ward, 2009).

La Comisión Nacional de las Zonas Áridas definió en 1970 como zonas áridas a aquellas superficies del territorio nacional en donde las precipitaciones son del orden de 250 mm anuales o menos, y como semiáridas a aquellas en donde la precipitación oscila entre más de 250 y menos de 500 mm (González-Medrano, 2012). Sin embargo, lo que en realidad provoca la aridez de los desiertos es que la precipitación sea menor que la pérdida potencial de agua a través de la evaporación y la transpiración de las plantas (Hernández, 2006; González-Medrano, 2012). Así, en desiertos de otros países, como el de Atacama en Chile, y el Namib en Namibia, dos de los lugares más secos de la Tierra, la energía del sol puede evaporar doscientas veces más de la lluvia que recibe en un año promedio, siendo el índice de aridez de 200 (Page, 1984) y ambas áreas se clasifican como hiperáridas (Ward, 2009).

La característica principal de los desiertos es la aridez determinada por sequías periódicas y extremas; justamente estas condiciones son necesarias para mantener la estructura de las comunidades desérticas (Hernández, 2006; Ward, 2009). Además de la aridez, otros factores que determinan el desarrollo de los desiertos son la morfología, la fisiología y el comportamiento de los organismos que los habitan (Hernández, 2006). Entre las principales características de los desiertos se encuentran la escasa precipitación (≤ 500 mm al año en promedio), que es el factor vital que controla los procesos biológicos, además de la variabilidad y lo impredecible de la precipitación, así como la alta evaporación (Hernández, 2006; Ward, 2009).

En la aridez también influye la orientación de los terrenos con respecto a la posición del sol, la exposición a los vientos y la variación diaria de la temperatura. Así, la diferencia entre precipitación y evapotranspiración provoca un alto déficit de humedad, el cual impone un reto enorme a los organismos que residen en los desiertos. Por medio de la evolución, los diferentes organismos desérticos (plantas, animales, microorganismos) han desarrollado adaptaciones especiales para tolerar las condiciones de estrés en las que viven (Hernández, 2006; Ward, 2009).

CAUSAS DE LA ARIDEZ

Pueden ser varias las causas de la aridez; por ejemplo, las cadenas montañosas provocan un efecto de sombra de lluvia; es decir, cuando las

masas de aire frío de los océanos ascienden al chocar con una montaña, se enfrían y descargan la mayor parte de su humedad sobre la vertiente de barlovento, que es el lugar de donde viene el viento (González-Medrano, 2012; Hernández, 2006). Posteriormente, el aire que fue privado de la mayor parte de su humedad desciende a través de la vertiente de sotavento, que es el lugar hacia donde se dirige el viento, sin producir lluvias, lo cual crea condiciones de aridez (González-Medrano, 2012; Hernández, 2006).

Una causa más de la aridez es la existencia de masas estables de alta presión con aire muy seco, las cuales resisten corrientes de convección; la localización de zonas de alta presión es resultado del patrón de circulación atmosférica del planeta (Hernández, 2006; Ward, 2009). También existe el fenómeno en el cual las corrientes oceánicas frías producen condiciones de aridez de varias regiones costeras, debido a que inhiben la formación de las corrientes ascendentes de aire necesarias para la formación de nubes (González-Medrano, 2012; Hernández, 2006).

La gran distancia desde los océanos hasta el interior de un continente, que ocasiona limitaciones de agua, como ocurre en los desiertos de Taklamakan y Gobi en China, también puede causar aridez (Ward, 2009). En estos casos, para el momento en que los vientos del oeste han soplado a través de Asia central, los vientos habrían viajado a lo largo de miles de kilómetros de tierra y, por tanto, habrían perdido la mayor parte de su humedad.

LOS DESIERTOS DE MÉXICO

Las zonas áridas y semiáridas de México reconocidas son el desierto sonoreño, el desierto chihuahuense, la región semiárida queretano-hidalguense y la región semiárida poblano-oaxaqueña, así como las regiones taulupeca, guerrerense, tehuantepeca, veracruzana y yucateca (Miranda, 1955). Según Rzedowski (1973), las primeras cuatro zonas presentan un clima caliente y seco con una precipitación anual menor a 500 mm. Las últimas cinco zonas presentan un clima caliente seco y semiseco, con una precipitación anual de hasta 900 mm y una vegetación fisonómicamente similar a las asociaciones vegetales con menor precipitación del bosque tropical seco (Rzedowski, 1978).

Las principales regiones desérticas de México, por su extensión, son el Desierto Chihuahuense, con 450 000 km² (Hernández, 2006), y el Desierto Sonorense, con 224 000 km² (Bradley y Colodner, 2020). Ambos desiertos comparten su distribución entre el sur de Estados Unidos y el norte de México (Bradley y Colodner, 2020; Hernández, 2006).

El desierto chihuahuense ocupa la porción septentrional del Altiplano Mexicano, entre altitudes de 1 000 y 2 200 metros sobre el nivel del mar. Comprende parte de los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Nuevo León, Tamaulipas, Guanajuato y Querétaro, en el territorio mexicano, y parte de Arizona, Texas y Nuevo México, en territorio estadounidense (Sosa *et al.*, 2020). La superficie de este desierto está surcada por numerosas cadenas montañosas, en donde abundan extensas cuencas endorreicas (caracterizadas porque sus aguas no desembocan en el mar sino en algún sistema de agua estancada como lagos o lagunas) o de drenaje deficiente (González-Medrano, 2012).

El desierto sonorense abarca parte de Sonora, Baja California y Baja California Sur y comprende siete regiones: Valle bajo del Colorado; Altiplano de Arizona; Planicie de Sonora; Piamonte de Sonora; Costa Central del Golfo; Región del Vizcaíno y Región Magdalena (González-Medrano, 2012). Tales regiones corresponden a sus características naturales desde tres puntos de vista: geográfico, fisiográfico y florístico, así como al carácter y organización de las comunidades vegetales (Shreve y Wiggins, 1964).

La región semiárida guerrerense se localiza en las inmediaciones de la cuenca del río Balsas, tanto en su parte alta como en la desembocadura en el Pacífico, y la región semiárida tehuantepeca se localiza en la cuenca del río Tehuantepec. Para ambas regiones se requieren estudios más detallados para determinar los límites entre zona árida y trópico seco (Granados-Sánchez *et al.*, 2012).

La zona semiárida queretano-hidalguense ocupa parte de los estados de México, Hidalgo y Querétaro; se localiza en los valles intermontanos y las barrancas de los afluentes del río Pánuco. La aridez de la zona se debe a la posición de sotavento de la Sierra Madre Oriental. Las diferencias en la fisiografía han influido sobre la vegetación; por ejemplo, la vegetación presente en los valles puede ser distinta a la de las laderas. Los valles de Actopan, Ixmiquilpan y Zimapán constituyen el llamado Valle del Mezquital, tan característico de esta zona semiárida (González-Medrano,

2012). Algunos autores consideran que esta región semiárida queretano-hidalguense corresponde al límite sur del desierto chihuahuense (Hernández y Gómez-Hinostrosa, 2005; Hernández *et al.*, 2010).

La zona semiárida poblano-oaxaqueña ocupa parte del este, sureste y sur del estado de Puebla, así como parte del noroeste del de Oaxaca, en el conocido como Valle de Tehuacán-Cuicatlán (González-Medrano, 2012). Los paisajes de este valle son espectaculares, característicos de los desiertos tropicales (Granados-Sánchez *et al.*, 2012).

La zona semiárida tamaulipeca cubre el centro y noreste de Tamaulipas, norte de Nuevo León y el noreste de Coahuila; en esta región se tiene entre 10 y 14% de precipitación durante el invierno como consecuencia de los “nortes”, los cuales son vientos del norte que soplan violentamente por varios días seguidos sobre las costas del golfo de México durante la época fría del año (González-Medrano, 2012). Estos vientos se originan por la invasión de masas de aire polar continental modificado, procedentes del norte de los Estados Unidos y sur de Canadá; al pasar sobre el golfo de México, recogen abundante humedad que después es liberada en forma de lluvia (García, 2003). Este suministro de humedad en esta época contribuye a que la zona –que por su latitud se esperaría que fuese más seca–, sea menos árida, y permite el desarrollo de una vegetación de mayor tamaño, con especies como *Cercidium macrum*, *Cordia boissieri*, *Eysenhardtia polystachya*, *Helietta parvifolia*, *Havardia pallens*, *Prosopis laevigata*, entre otras (González-Medrano, 2012; Reid *et al.*, 1990).

La región semiárida veracruzana más conocida es el Valle de Perote-Alchichica, en el municipio Perote, ubicado en el centro del estado; sin embargo, se han reportado otras dos zonas semiáridas cubiertas con matorral xerófilo: 1) Barranca Santiago, en el municipio Huayacocotla, al norte del estado, y 2) la región semiárida de los municipios Acultzingo y Maltrata, en el centro-sur del estado (Rivera-Hernández *et al.*, 2019).

La región semiárida yucateca se encuentra en el noroeste del estado, primordialmente en la zona costera; el clima va desde cálido semiárido (26°C y precipitaciones de hasta 700 mm) hasta el semiárido muy cálido (menos de 600 mm anuales y 28°C en Progreso y Telchac) (Orellana *et al.*, 2003). La zona más seca de la Península se encuentra en el noroeste de Yucatán, incluyendo la franja litoral comprendida entre Sisal y Telchac (Leirana-Alcocer *et al.*, 2015).

TIPOS DE VEGETACIÓN DESÉRTICA

Rzedowski (1978) recomienda incluir todas las comunidades de porte arbustivo, propias de las zonas áridas y semiáridas, bajo el rubro colectivo de matorral xerófilo. Esta decisión está apoyada en las afinidades de tipo ecológico y florístico que presentan entre sí las diferentes comunidades que prosperan en esas regiones. Sin embargo, anteriormente el mismo autor (Rzedowski, 1965) realizó una clasificación más detallada de la vegetación de las zonas áridas y semiáridas, incluyendo mezquital extradesértico; zacatal; matorral desértico micrófilo; matorral desértico rosetófilo; matorral crasicaule; matorral submontano; encinar arbustivo o chaparral y piñonar.

El mezquital extradesértico es un tipo de vegetación con dominancia de mezquites (*Prosopis* spp.), el cual ocupa terrenos planos o poco inclinados, caracterizados por suelo profundo, con nivel freático permanente o temporal al alcance de sus raíces (Rzedowski, 1965). Los mezquites tienen muchos usos: su madera es usada como combustible y para construcción de cercas; sus vainas se usan como forraje para animales y como alimento para el ser humano; la resina que produce se usa en la fabricación de pegamentos y barnices y sus flores son muy importantes en la producción de miel (Rodríguez Saucedo *et al.*, 2014).

El zacatal se caracteriza por presentar una vegetación abierta dominada por especies herbáceas y cuya producción primaria es aprovechada directamente por los herbívoros (Miller, 1990). Al sur del desierto chihuahuense, los zacatales se asocian con suelos inundables salinos/sódicos (halófilos), o bien, ricos en contenido de sulfato de calcio (gipsófilos; Rzedowski, 1965).

Los zacatales son particularmente adecuados para la alimentación del ganado bovino y equino, y de hecho la mayor parte de la superficie correspondiente a este tipo de vegetación se dedica a tal propósito. Un serio problema en el manejo de los zacatales de clima semiárido y árido son las largas épocas de sequía, en las cuales coinciden la falta de agua y de alimento para los animales. Sobre todo, son difíciles de afrontar los años más secos que los comunes, que frecuentemente se traducen en una gran mortandad del ganado vacuno, no muy resistente para soportar la escasez temporal de agua y de comida (Rzedowski, 2006).

El matorral desértico micrófilo se caracteriza por tener elementos arbustivos de hoja pequeña, como el hojaseñ (*Flourensia cernua*), la

gobernadora (*Larrea tridentata*), entre otras (Rzedowski, 1978). Este tipo de vegetación es propia de terrenos planos y partes inferiores de los cerros (Rzedowski, 1965). Algunas especies de este matorral son usadas por los seres humanos; por ejemplo, las hojas de la gobernadora se usan para dolor de estómago, dolor de bazo, cálculos renales, cálculos vesicales, paludismo, artritis, como antiséptico y cicatrizante, para infecciones de la piel, como antibiótico y antimicótico, contra mareos. Sin embargo; hay que tener cuidado porque puede causar hepatotoxicidad. Las hojas del hojásén tienen también diversos usos: antidiarreico, como digestivo y aperitivo, contra cólicos estomacales, empacho, como expectorante, desinfectante y antiparasitario (González-Ferrara, 2010).

El matorral desértico rosetófilo se caracteriza por presentar especies arbustivas y subarbustivas de hojas alargadas, estrechas y agrupadas en forma de roseta (Rzedowski, 1978) y tiene predominancia de especies del género *Agave* (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2015). Este tipo de vegetación se encuentra en las laderas de los cerros y desciende hasta su base (Rzedowski, 1965).

En este tipo de matorral se encuentran especies de mucha utilidad para los seres humanos; por ejemplo, el *Agave lechuguilla* se utiliza para extraer fibras con las cuales se elaboran textiles (Reyes-Agüero *et al.*, 2000). Además, de diversas especies de *Agave*, se producen bebidas fermentadas obtenidas a partir de la savia de la inflorescencia, tanto de los jugos de las hojas crudas como de los jugos de las cabezas cocidas (tallo más base de las hojas), así como también se producen bebidas destiladas (Colunga-García Marín *et al.*, 2007).

El matorral crasicaule se caracteriza por presentar abundancia de plantas arbustivas de tallos suculentos o carnosos, representada principalmente por las “nopaleras”. Se desarrolla en laderas, cañones, depresiones, abanicos aluviales y llanuras (Rzedowski, 1965). En este tipo de matorral, diversas especies de nopal (*Opuntia* spp.) se utilizan por sus frutos (tunas) y tallos comestibles (nopalitos), por sus aplicaciones farmacológicas y cosméticas, así como forraje para animales (Stintzing y Carle, 2005). Otra especie útil del matorral crasicaule es el garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*), que se utiliza como alimento (frutos), forraje, leña y cerca viva (Paredes-Flores *et al.*, 2007).

El matorral submontano se caracteriza por la predominancia de arbustos altos o árboles bajos, originarios de bosques tropicales. Se presenta en

cerros poco elevados o porciones bajas de montañas altas, en altitudes entre 700 y 1 800 msnm (Rzedowski, 1965). Dos especies de plantas típicas de este tipo de vegetación son la barreta (*Helietta parvifolia*) y tenaza (*Havardia pallens*); la barreta se utiliza para construcción de corrales y cercas y la tenaza para la elaboración de sillas y sillones rústicos (Estrada-Castillón *et al.*, 2018).

Los encinares arbustivos o chaparrales se caracterizan por la dominancia de especies arbustivas del género *Quercus* (Rzedowski, 1965). Fisonómicamente se caracteriza por ser un matorral de hasta 3 m de altura, casi siempre denso o muy denso, pero el principal rasgo característico de las plantas de chaparral son las hojas esclerófilas o duras (Granados-Sánchez *et al.*, 2011). Los encinares arbustivos son poco usados por el ser humano y por sus animales domésticos; aunque algunas especies se utilizan como combustible (Rzedowski, 1965) y diversas cactáceas que se encuentran debajo de los arbustos se utilizan como plantas de ornato (Arredondo-Gómez y Sotomayor, 2009).

Los piñonares son bosques de pinos piñoneros, principalmente *Pinus cembroides*, que habitan en pequeñas sierras de las zonas áridas y semiáridas del norte de México (Romero *et al.*, 2014). Se consideran como un tipo de vegetación aparte de los pinares por presentar dominancia de pinos piñoneros y por responder a condiciones ecológicas (ambientes semiáridos) distintas a las que exigen las comunidades en que dominan otras especies del género *Pinus* (Rzedowski, 1965).

La importancia de los piñonares en términos fitogeográficos y ecológicos es que México es el segundo centro de diversidad de piñoneros y que varias especies de piñoneros son endémicas de México (Romero *et al.*, 2014). Los piñonares son fuente de leña, carbón y en menor proporción, para obtener madera para construcción (Sánchez-González, 2008).

También proporcionan albergue para la fauna nativa e influyen en los procesos hidrológicos, edáficos y atmosféricos al mitigar gases de efecto invernadero (Romero *et al.*, 2014). Los piñonares han sido fuente de abasto de piñones desde tiempos ancestrales; existe demanda de estas semillas para venta en el mercado nacional y extranjero por el uso que tienen los piñones en confitería, especialmente los de la especie *P. cembroides* (Sánchez-González, 2008).

Cabe destacar que en todos los tipos de vegetación mencionados se encuentran especies, principalmente de la familia Cactaceae, que están

en alguna categoría de riesgo de extinción (Goettsch *et al.*, 2015). Así, la conservación de estos tipos de vegetación desértica es importante tanto por la preservación de las especies como para aprovechar de manera sostenible sus recursos.

ADAPTACIONES DE LOS ORGANISMOS DESÉRTICOS

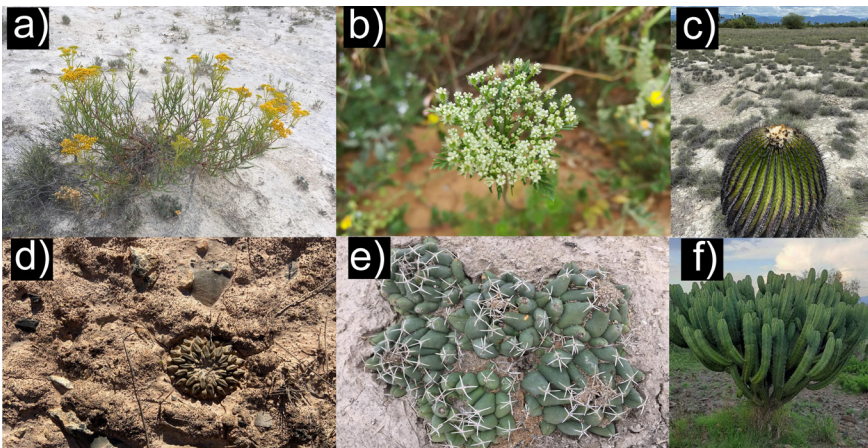
A través de la evolución, los diferentes organismos desérticos han desarrollado adaptaciones para tolerar las condiciones de estrés en las que viven (Hernández, 2006; Ward, 2009). Biólogos, ecólogos y estudiosos de áreas afines de recursos naturales han visto a los desiertos, no solamente de México, sino de todo el mundo, como laboratorios de la naturaleza en los cuales la selección natural está expuesta de manera extrema (Pacific y Patch, 2021). Generaciones de científicos se han centrado en las numerosas adaptaciones únicas de plantas y animales para sobrevivir al duro ambiente desértico; tales estudios han hecho que las adaptaciones de organismos desérticos sean algunos de los ejemplos más conocidos de la selección natural darwiniana (Ward, 2009).

Algunas adaptaciones de las plantas en los desiertos son los sistemas de raíces anchos y profundos; los tejidos (tallos, hojas o raíces) almacenadores de agua (suculencia); las cubiertas protectoras, pelos o cubiertas cerosas; la reducción de la superficie foliar y los tallos fotosintetizadores (González-Medrano, 2012). Otra adaptación importante de las plantas desérticas es el tipo de fotosíntesis; por ejemplo, las cactáceas y muchas otras especies suculentas utilizan la vía del metabolismo ácido de las crasuláceas (MAC) para reducir al mínimo la fotorrespiración (Andrade *et al.*, 2007). Este nombre proviene de la familia de las plantas crasuláceas, en las cuales los científicos descubrieron por primera vez esta vía (Bennet-Clark, 1933). Las especies de plantas que usan la fotosíntesis MAC no sólo evitan la fotorrespiración, sino que también usan el agua de forma muy eficiente (Andrade *et al.*, 2007). Sus estomas sólo se abren por la noche, cuando la humedad tiende a subir y la temperatura a bajar, y ambos factores reducen la pérdida de agua de las hojas (Andrade *et al.*, 2007).

También existen formas biológicas sobresalientes de las plantas de zonas áridas de México (figura 2), e.g. anuales de verano, como *Flaveria*

oppositifolia, y anuales de invierno, como *Daucus pusillus*; herbáceas perennes (graminiformes), como *Sporobolus* sp.; erectas, como *Zaluzania* sp.; rastreras, como *Kallstroemia parviflora*; y trepadoras, como *Maximowiczia* sp.; epífitas, como *Tillandsia recurvata*; especies de tallo suculento sencillo, como *Echinocactus platyacanthus*; de tallo enterrado, como *Pelecyphora aselliformis*; gregario, como *Coryphanta maíz-tablasensis*; ramificado, como *Myrtillocactus geometrizans*; y articulado, como *Opuntia* spp.; especies de tallo reducido en forma de caudex (caudex corto, como *Agave salmiana*, o bien caudex largo, como *Yucca filifera*); plantas sin hojas, como *Koerberlinia* sp.; plantas de hoja decidua o caediza, como *Prosopis* spp.; plantas con hojas cubiertas de exudado resinoso, como *Larrea tridentata*; plantas con hojas cubiertas de tomento o pelillo blanco (*Leucophyllum* sp.); plantas de hojas duras o coriáceas, como *Mortonia greggii* (Rzedowski, 1968).

FIGURA 2



Ejemplo de algunas formas biológicas sobresalientes de las plantas de zonas áridas de México. a) *Flaveria oppositifolia*, especie anual de verano; b) *Daucus pusillus*, especie anual de invierno; c) *Echinocactus platyacanthus*, especie de tallo suculento sencillo; d) *Pelecyphora aselliformis*, especie con tallo enterrado; e) *Coryphanta maíz-tablasensis*, especie gregaria; f) *Myrtillocactus geometrizans*, especie con tallo ramificado.

Fuente: Alfredo Ramírez-Hernández y Joel Flores.

Con respecto a la fauna desértica, se conocen las adaptaciones de los animales evasores y de los animales evaporadores. El término *evasor* se refiere al comportamiento de los animales, lo que ayuda a prevenir el

sobrecalentamiento del cuerpo en días calurosos y soleados, y evita la necesidad de enfriamiento por evaporación y pérdida de agua, que no es factible para los animales pequeños que viven en un hábitat árido. Los animales pequeños, generalmente clasificados como evasores, incluyen invertebrados, anfibios y reptiles del desierto, y también mamíferos más pequeños, roedores e insectívoros. Los animales evasores hacen uso de microambientes, como grietas de rocas sombreadas, madrigueras subterráneas y sombra proyectada por plantas, con el fin de regular la temperatura de sus cuerpos. Los evasores también utilizan este comportamiento para evitar un enfriamiento excesivo del cuerpo, retirándose para refugiarse cuando la temperatura ambiental disminuye por la noche (Ward, 2009).

Los animales *evaporadores* son aquellos que dependen de suficiente ingesta de agua que les permite enfriar la temperatura de sus cuerpos por evaporación (Willmer *et al.*, 2000). Pocas de estas especies pueden sobrevivir en los desiertos, y aquellos que lo hacen viven en los bordes de tales desiertos, en donde tengan acceso al agua, o cuentan con adaptaciones fisiológicas y de comportamiento que reducen la dependencia del enfriamiento evaporativo. Entonces, para los evaporadores, la evasión puede ser una parte importante de su estrategia termorreguladora. Los evaporadores incluyen mamíferos de tamaño mediano, como conejos, perros, zorros e incluso aves.

RIQUEZA, DIVERSIDAD Y ENDEMISMOS DE LOS DESIERTOS MEXICANOS

Los desiertos mexicanos tienen aproximadamente 6 000 especies de plantas, número mayor al conocido para selvas húmedas mexicanas, las cuales poseen 5 000 especies vegetales (Inegi, 2008). El Desierto Chihuahuense, además de ser el de mayor tamaño, posee la mayor riqueza de especies. En específico, se conocen 3 382 especies de plantas (Henrickson y Johnston, 2007); 560 de ellas, de distribución endémica (Villarreal-Quintanilla *et al.*, 2017). La rica diversidad nativa de esta región incluye 325 especies de aves, 176 especies de mamíferos, 156 especies de reptiles, 120 especies de peces y 46 de anfibios (Mittermeier *et al.*, 2002). Específicamente, los peces en este desierto se encuentran en

lagunas aisladas, por lo cual generalmente son endémicos y de distribución restringida, a veces a un solo manantial (Contreras-Balderas, 1969).

Además, el Desierto Chihuahuense es el hábitat de 318 de las 550 especies de cactáceas mexicanas y aproximadamente 1 500 especies conocidas en América (Hernández y Gómez-Hinostrosa, 2005). Así, este desierto es considerado uno de los principales centros de diversidad de cactáceas en el mundo (Goetsch *et al.*, 2015). En específico, la región de El Huizache (Guadalcázar, SLP) es única en el mundo por albergar la más alta densidad de especies de cactáceas (Hernández, 2006). Sobre una superficie de 2 855 km², existen al menos 75 especies de cactáceas. Esta región se denomina en la actualidad Área Natural Protegida del Real de Guadalcázar, con nivel estatal (Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 1997).

Para el segundo desierto más grande en México, el Desierto Sonorense, se conocen 2 000 especies de plantas, de las cuales 552 son endémicas (Hernández, 2006). La riqueza de esta región incluye 206 especies de aves, 148 de reptiles, 108 de mamíferos, 30 de peces y 16 de anfibios (Hernández, 2006).

El tercer desierto mexicano en tamaño, el Valle de Tehuacán, posee 3 600 especies de plantas (Romero, 2018). Tal riqueza de plantas, inclusive mayor que la que se presenta en el Desierto Sonorense, se debe a la gran diversidad de tipos de vegetación que posee, a las altitudes que se alcanzan en la región (entre los 545 y los 2 458 metros sobre el nivel del mar) y a los afloramientos geológicos de diversa naturaleza y edad, que hacen de la región una serie de mosaicos con características y manifestaciones propias (Villaseñor *et al.*, 1990). El endemismo de plantas se estima en un 30%; además, el sureste del valle de Tehuacán es considerado uno de los tres centros mexicanos más ricos en el grupo taxonómico *Agave* (Arriaga *et al.*, 2000). Con respecto a fauna, la región es el hábitat de 373 especies de aves, 133 de mamíferos, 93 de reptiles y 38 de anfibios, así como 765 de insectos (Zarazúa-Carbajal *et al.*, 2020).

El Valle de Tehuacán es un sitio considerado clave para el origen y desarrollo de la agricultura en Mesoamérica, ya que ha proporcionado información sobre la domesticación de algunos de los componentes fundamentales de la dieta mexicana, como el chile (*Capsicum annum*; Pickersgill, 2017), así como el maíz (*Zea mays*), la calabaza (*Cucurbita* sp.) y el frijol (*Phaseolus vulgaris*; Torres-Rodríguez *et al.*, 2018).

EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS DESIERTOS MEXICANOS

Diversos modelos desarrollados por el Panel Intergubernamental Sobre el Cambio Climático indican que la temperatura continuará aumentando durante este siglo, y podría alcanzar para 2090 entre 3 y 5°C por encima de la temperatura media de la década de 1990 (IPCC, 2014). Este calentamiento puede perjudicar seriamente los procesos de vegetación (Hänel y Tielbörger, 2015; Hughes, 2000; McLaughlin *et al.*, 2002; Sih *et al.*, 2011).

Las proyecciones de cambio climático para México sugieren que la temperatura media anual podría aumentar 1.5 °C para el año 2030, 2.3°C para el año 2060 y 3.7°C para el año 2090; además, la precipitación anual disminuiría -6.7% para el año 2030, -9.0% para el año 2060 y -18.2% para el año 2090 (Sáenz-Romero *et al.* 2010). Este panorama crítico ha creado fuerte incertidumbre en los biólogos conservacionistas debido que los desiertos mexicanos albergan una elevada riqueza de cactáceas (Rzedowski 1991), muchas de las cuales se encuentran protegidas por la ley ambiental mexicana (Semarnat, 2010). Sin embargo, existe poca información acerca de los umbrales de tolerancia térmica para estas especies, y algunos estudios ya han indicado los efectos negativos del calentamiento en su rendimiento fisiológico (Aragón-Gastélum *et al.*, 2014; Martorell *et al.* 2015) y la supervivencia de plántulas de especies desérticas (Aragón-Gastélum *et al.* 2017), lo que puede impedir la persistencia de sus poblaciones en el futuro.

Este calentamiento global inducido por el ser humano aumenta el riesgo de extinción de especies vegetales con baja tolerancia al aumento de temperatura (Malcolm *et al.*, 2006). Sin embargo, las respuestas de las plantas al calentamiento climático se han evaluado principalmente en zonas tropicales y bosques templados, o en ecosistemas árticos y alpinos, mientras que poco se sabe aún sobre los efectos del calentamiento en las plantas del desierto (Tielbörger y Salguero-Gómez 2014; Aragón-Gastélum *et al.*, 2014). Esta situación se debe quizá a la expectativa general de que la vegetación desértica se expandirá como consecuencia del cambio climático (Prentice *et al.*, 1992). Tal expectativa se basa en la suposición de que las plantas desérticas pueden adaptarse rápidamente a la escasez de agua y a las altas temperaturas porque evolucionaron en

hábitats estresantes con condiciones climáticas muy variables (Vicente-Serrano *et al.* 2013; Tielbörger y Salguero-Gómez 2014).

La mayoría de las predicciones de cambio global en especies desérticas ha sido realizada para plantas adultas, y sugiere que estas plantas aumentarán su distribución por ser muy tolerantes al estrés abiótico (Vicente-Serrano *et al.* 2013; Tielbörger y Salguero-Gómez 2014). Sin embargo, se han descuidado otras fases de desarrollo de las plantas, tales como la germinación de semillas y la supervivencia de plántulas o plantas jóvenes, las cuales son a menudo más susceptibles a estrés por temperatura, sequía o actividades humanas, que las plantas adultas (Aragón-Gastélum *et al.*, 2018).

Maestre *et al.* (2012) documentaron que la mayor parte de la investigación sobre el cambio global (incluido el calentamiento) en ambientes áridos y semiáridos se ha realizado sobre una base unidisciplinaria, así como que los estudios realizados utilizan una amplia gama de organismos (desde microorganismos hasta humanos), escalas espaciales (de local a global) y temas (desde demografía de plantas hasta alivio de la pobreza). Estos estudios destacan las complejidades y dificultades asociadas con la predicción de tales impactos. También identifican la necesidad de realizar experimentos a largo plazo, así como enfoques multidisciplinarios, como áreas prioritarias para futuras investigaciones sobre estos ambientes. Tales autores proponen estudiar cómo las respuestas de los individuos, las poblaciones y las comunidades de ambientes áridos y semiáridos, al calentamiento global, afectarán a su vez los servicios de los ecosistemas. Así, la investigación futura debería explorar los vínculos entre estas respuestas y sus efectos sobre el agua y el clima, así como la provisión de servicios para el desarrollo y el bienestar humanos.

CONCLUSIONES

Los desiertos mexicanos mantienen una vasta diversidad biológica, con diferentes tipos de vegetación y con especies adaptadas a las condiciones de aridez, muchas de las cuales han sido útiles desde épocas prehispánicas, y lo siguen siendo ahora, tanto para las etnias locales como para las poblaciones mestizas. Desafortunadamente, en estos ambientes también

se encuentran muchas especies en categoría de riesgo de extinción, las cuales requieren de mayor protección. Así, es prioritario el manejo de recursos naturales (el cual implica uso y conservación), y que se realice de manera sostenible. Un aspecto importante de conocer para el manejo de estos recursos es la tolerancia de las especies al calentamiento futuro, con base en diferentes disciplinas, como la anatomía funcional, la biología molecular, la bioquímica y la ecofisiología, así como con estudios a mediano y largo plazo.

REFERENCIAS

- ALANÍS-RODRÍGUEZ, E., Mora-Olivo, A., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Yerena Yamallel, J. I., Martínez-Ávalos, J. G., y González-Rodríguez, L. E. (2015). "Composición y diversidad del matorral desértico rosetófilo en dos tipos de suelo en el noreste de México", *Acta Botánica Mexicana*, 110, 105-117.
- ANDRADE, J. L., de la Barrera, E., García, C. R., Ricalde, M. F., Soto, G. V., y Cervera, J. C. (2007). "El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad", *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 81, 37-50.
- ARAGÓN-GASTÉLUM, J. L., Badano, E., Yáñez-Espinosa, L., Ramírez-Tobías, H., Rodas-Ortiz, J. P., González-Salvatierra, C., y Flores, J. (2017). "Seedling survival of three endemic and threatened Mexican cacti under induced climate change", *Plant Species Biology*, 32, 92-99.
- ARAGÓN-GASTÉLUM, J. L., Flores, J., Jurado, E., Ramírez-Tobías, H. M., Robles-Díaz, E., Rodas-Ortiz, J. P., y Yáñez-Espinosa, L. (2018). "Potential impact of global warming on seed bank, dormancy and germination of three succulent species from the Chihuahuan Desert", *Seed Science Research*, 28(4), 312-318.
- ARAGÓN-GASTÉLUM, J. L., Flores, J., Yáñez-Espinosa, L., Badano, E., Ramírez-Tobías, H., Rodas-Ortiz, J. P., y González-Salvatierra, C. (2014). "Induced climate change impairs photosynthetic performance in *Echinocactus platyacanthus*, an especially protected Mexican cactus species", *Flora*, 209, 499-503.

- ARIZAGA, S., Ezcurra, E., Peters, E., de Arellano, F. R., y Vega, E. (2000). "Pollination ecology of *Agave macroacantha* (Agavaceae) in a Mexican tropical desert. II. The role of pollinators", *American Journal of Botany*, 87(7), 1011-1017.
- ARONSON, J., Le Flo'h, E., y Ovalle, C. (2002) "Semi-arid woodlands and desert fringes", en M. Perrow y A. Davy (eds.), *Handbook of ecological restoration*. Cambridge, GB: Cambridge University Press, 466-485.
- ARREDONDO-GÓMEZ, A., y Sotomayor, J. M. (2009). *Cactáceas en categoría de riesgo del estado de San Luis Potosí*. México: Inifap.
- ARRIAGA, L., Espinoza, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., y Loa, E. (coords.) (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. México: Conabio.
- BADANO, E. I., Samour-Nieva, O. R., Flores, J., Flores-Flores, J. L., Flores-Cano, J. A., y Rodas-Ortiz, J. P. (2016). "Facilitation by nurse plants contributes to vegetation recovery in human-disturbed desert ecosystems", *Journal of Plant Ecology*, 9, 485-497.
- BENNET-CLARK, T. A. (1933). "The role of the organic acids in plant metabolism, part I", *New Phytologist*, 32, 37-71.
- BRADLEY, C. M., y Colodner, D. (2020). "The Sonoran Desert", *Encyclopedia of the World's Biomes*, vol. 2, 110-125.
- CLARK-TAPIA, R., y Molina-Freaner, F. (2004). "Reproductive ecology of the rare clonal cactus *Stenocereus eruca* in the Sonoran Desert", *Plant Systematics and Evolution*, 247(3), 155-164.
- COLUNGA-GARCÍA MARÍN, P., Zizumbo-Villarreal, D., y Martínez-Torres, J. (2007). "Tradiciones en el aprovechamiento de los agaves mexicanos: una aportación a la protección legal y conservación de su diversidad biológica y cultural", en P. Colunga-GarcíaMarín, A. Larqué Saavedra, L. E. Eguiarte y D. Zizumbo-Villarreal (eds.), *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves*. Mérida, Yuc.: Centro de Investigación Científica de Yucatán, 229-248.
- CONTRERAS-BALDERAS, S. (1969). "Perspectivas de la ictiofauna en las zonas áridas del norte de México", en *Memorias del Primer Simposio Internacional de Aumento de la Producción de Alimento en Zonas Áridas*. ICASALS Publ. 3, 293-304.

- DELGADO, C., Rosegrant M., y Meijer, S. (2001). "Livestock to 2020: the revolution continues", ponencia presentada en las Annual Meetings of the International Agricultural Trade Research Consortium (IATRC), Auckland, Nueva Zelanda, 18 y 19 de enero de 2001.
- ESTRADA-CASTILLÓN, E., Villarreal-Quintanilla, J. Á., Rodríguez-Salinas, M. M., Encinas-Domínguez, J. A., González-Rodríguez, H., Figueroa, G. R., y Arévalo, J. R. (2018). "Ethnobotanical survey of useful species in Bustamante, Nuevo León, México", *Human Ecology*, 46, 117-132.
- FAO (2017). *The future of food and agriculture – trends and challenges*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FLORES, J., y Jurado, E. (2003). "Are nurse-protégé interactions more common among plants from arid environments?", *Journal of Vegetation Science*, 14, 911-916.
- GARCÍA AMARO DE MIRANDA, E. (2003). "Distribución de la precipitación en la república mexicana", *Investigaciones Geográficas*, 50, 67-76.
- Gobierno del Estado de San Luis Potosí (1997). "Declaratoria del 'área natural protegida bajo la modalidad de reserva estatal con características de reserva de la biosfera, la región históricamente denominada 'Real de Guadalcázar', ubicada en el municipio del mismo nombre". San Luis Potosí: Periódico Oficial del Gobierno del Estado de San Luis Potosí.
- GOETTSCHE, B., Hilton-Taylor C., Cruz-Piñón G., Duffy, J. P., Frances, A., Hernández, H. M., Inger, R., Pollock, C., Schipper, J., Superina, M., Taylor, N. P., Tognelli, M., Abba, A. M., Arias, S., Arreola-Nava, H. J., Baker, M. A., Bárcenas, R. T., Barrios, D., Braun, P., Butterworth, C. A., Búrquez, A., Caceres, F., Chazaro-Basañez, M., Corral-Díaz, R., Del Valle Perea, M., Demaio, P. H., Duarte De Barros, W. A., Durán, R., Yancas, L. F., Felger, R. S., Fitz-Maurice, B., Fitz-Maurice, W. A., Gann, G., Gómez-Hinostrosa, C., Gonzales-Torres, L. R., Griffith, M. P., Guerrero, P. C., Hammel, B., Heil, K. D., Hernández-Oria, J. G., Hoffmann, M., Ishihara, M. I., Kiesling, R., Larocca, J., León-De La Luz, J. L., Loaiza S., C. R., Lowry, M., Machado, M. C., Majure, L. C.,

- Martínez-Ávalos, J. G., Martorell, C., Maschinski, J., Méndez, E., Mittermeier, R. A., Nassar, J. M., Negrón-Ortiz, V., Oakley, L. J., Ortega-Baes, P., Ferreira, A. B. P., Pinkava, D. J., Porter, J. M., Puente-Martínez, R., Gamarra, J. R., Pérez, P. S., Martínez, E. S., Smith, M., Sotomayor M. del C, J. M., Stuart, S. N., Tapia-Muñoz, J. L., Terrazas, T., Terry, M., Trevisson, M., Valverde, T., Van Devender, T. R., Véliz-Pérez, M. E., Walter, H. E., Wyatt, A., Zappi, D., Zavala-Hurtado, J. A. y Gaston, K. J. (2015). "High proportion of cactus species threatened with extinction". *Nature Plants*, 1, 1542.
- GONZÁLEZ-FERRARA, M. (2010). "Plantas medicinales de Nuevo León", en M. A. Alvarado-Vázquez, A. Rocha-Estrada y S. Moreno-Limón (eds.), *De la lechuguilla a las biopelículas vegetales*. Monterrey, N.L.: Universidad Autónoma de Nuevo León, 109-143.
- GONZÁLEZ-MEDRANO, F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*. México: Instituto Nacional de Ecología / Semarnat.
- GRANADOS-SÁNCHEZ, D., Hernández-García, M. A., y López Ríos, G. F. (2012). *Ecología de los desiertos del mundo*. Chapingo, Estado de México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- GRANADOS-SÁNCHEZ, D., Sánchez-González, A., Granados Victorino, R. L., y Borja de la Rosa, A. (2011). "Ecología de la vegetación del Desierto Chihuahuense", *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17 (edición especial), 111-130.
- HÄNEL, S., y Tielbörger, K. (2015). "Phenotypic response of plants to simulated climate change in a long-term rain-manipulation experiment: a multi-species study", *Oecologia*, 177, 1015-1024.
- HENRICKSON, J., y Johnston, M.C. (2007). *A flora of the Chihuahuan Desert region*. Los Ángeles, CA, EE. UU.: J Henrickson.
- HERNÁNDEZ, H. M. (2006). *La vida en los desiertos mexicanos*. México: Fondo de Cultura Económica (La Ciencia Para Todos 213).
- HERNÁNDEZ, H. M., y Gómez-Hinostrosa, C. (2005). "Cactus diversity and endemism in the Chihuahuan Desert Region", en J. L. Cartton, G. Ceballos y R. Felger (eds.), *Biodiversity, ecosystems and conservation in Northern Mexico*. Nueva York: Oxford University Press, 264-275.

- HERNÁNDEZ, H. M., Gómez-Hinostrosa, C., y Hoffmann, G. (2010). "Is geographical rarity frequent among the cacti of the Chihuahuan Desert?", *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81(1), 163-175.
- HUGHES, L. (2000). "Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?", *Trends in Ecology & Evolution*, 15, 56-61.
- IPCC (2014). *Summary for policymakers*. Cambridge: Cambridge University Press / Intergovernmental Panel on Climate Change.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2008). "Área de capacitación, regiones naturales y biogeografía de México". <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/regionesnaturalesbiogeografiamexico.pdf>.
- LEIRANA-ALCOCER, J. L., & Cervera, J. C. (2015). "Propuesta de especies de plantas suculentas nativas (cactáceas y agaváceas) con potencial económico frente al escenario futuro de sequías en Yucatán", *Bioagrobiencias*, 8, 23-31.
- LEIRANA-ALCOCER, J. L., Cervera-Herrera, J. C., y Navarro-Alberto, J. (2018). "Magueyes silvestres de Yucatán", *Ecofronteras*, 22(63), 31-33.
- LÓPEZ-FLORES, D., Zavala-Hurtado, J. A., Golubov, J., y Mandujano, M. C. (2018). "Spatial distribution and association with nurse plants of the bishop's miter cactus *Astrophytum myriostigma* in the Chihuahuan Desert", *Southwestern Naturalist*, 63, 186-193.
- MALCOLM, J. R., Liu, C., Neilson, R. P., Hansen, L., y Hannah, L. E. E. (2006). "Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots", *Conservation Biology*, 20, 538-548.
- MAESTRE, F. T., Salguero-Gómez, R., y Quero, J. L. (2012). "It is getting hotter in here: determining and projecting the impacts of global environmental change on drylands", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1606), 3062-3075.
- MARTORELL, C., Montañana, D. M., Ureta, C., y Mandujano, M. C. (2015). "Assessing the importance of multiple threats to an endangered globose cactus in Mexico: cattle grazing, looting and climate change", *Biological Conservation*, 181, 73-81.
- MCCLUNEY, K. E., y Sabo, J. L. (2009). "Water availability directly determines per capita consumption at two trophic levels", *Ecology*, 90(6), 1463-1469.

- McCLUNEY, K. E., Belnap, J., Collins, S. L., González, A. L., Hagen, E. M., Nathaniel Holland, J., Kotler, B. P., Maestre, F. T., Smith, S. D., y Wolf, B. O. (2012). "Shifting species interactions in terrestrial dryland ecosystems under altered water availability and climate change", *Biological Reviews*, 87(3), 563-582.
- McLAUGHLIN, J. F., Hellmann, J. J., Boggs, C. L., y Ehrlich, P. R. (2002). "Climate change hastens population extinctions", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 6070-6074.
- MILLER, G. T. (1990). *Resource conservation and management*. Belmont, California: Wadsworth Publishing Company.
- MIRANDA, F. (1955). "Formas de vida vegetales y el problema de la delimitación de las zonas áridas de México", en *Mesas redondas sobre problemas de las zonas áridas de México*. México: IMRNR, 85-119 .
- MITTERMEIER, R. A., Mittermeier, C. G., Robles-Gil, P., Pilgrim, J., da Fonseca, G. A. B., Brooks, T., y Konstant, W. R. (eds.) (2002). *Wilderness: Earth's last wild places*. México: Cemex.
- MURO-PÉREZ, G., Jurado, E., Flores, J., Sánchez-Salas, J., García-Pérez, J., y Estrada, E. (2012). "Positive effects of native shrubs on three specially protected cacti species in Durango, México", *Plant Species Biology*, 27, 53-58.
- ORELLANA, R., Islebe, G., y Espadas, C. (2003). "Presente, pasado y futuro de los climas de la península de Yucatán", en P. Colunga, A. García Marín y A. Larqué Saavedra (eds.), *Naturaleza y sociedad en el área maya*. Mérida, Yuc.: AMC / CICY, 37-59.
- PACIFIC, G., y Patch, G. (2021). "Plant adaptations to the Atacama Desert", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(46), eiti4621118.
- PAGE, J. (1984). *Arid Lands*. Arlington, VA.: Time-Life Books.
- PAREDES-FLORES, M., Lira Saade, R., y Dávila Aranda, P. D. (2007). "Ethnobotanical study of Zapotitlan Salinas, Puebla", *Acta Botánica Mexicana*, 79, 13-61.
- PÉREZ-SÁNCHEZ, R. M., Flores, J., Jurado, E., y González-Salvatierra, C. (2015). "Growth and ecophysiology of succulent seedlings under the protection of nurse plants in the Southern Chihuahuan Desert", *Ecosphere*, 6, 1-21.

- PICKERSGILL, B. (2017). "The domestication of chili peppers", en P. J. Ukko y G. W. Dumbleby (eds.). *The domestication and exploitation of plants and animals*. Nueva York: Routledge, 443-450.
- PRENTICE, I.C., Cramer, W., Harrison, S.P., Leemans, R., Monserud, R.A. y Solomon, A.M. (1992). "Special paper: a global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate". *Journal of Biogeography*, 19, 117-134.
- PUENTE, M. E., Li, C. Y., y Bashan, Y. (2009). "Endophytic bacteria in cacti seeds can improve the development of cactus seedlings", *Environmental and Experimental Botany*, 66, 402-408.
- REID, N., Stafford, S. D., Beyer-Miinzal, P., y Marroquín, J. (1990). "Floristic and structural variation in the Tamaulipan thornscrub, northeastern Mexico", *Journal of Vegetation Science*, 1, 529-538.
- REYNOLDS, J. F., Smith, D. M. S., Lambin, E. F., Turner, B. L. I. I., Mortimore, M., Batterbury, S. P. J., Downing, T. E., Dowlatabadi, H., Fernandez, R. J., Herrick, J. E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F. T., Ayarza, M., y Walker, B. (2007). "Global desertification: building a science for dryland development", *Science*, 316, 847-851.
- REYES-AGÜERO, J. A., Aguirre-Rivera, J. R., y Peña-Valdivia, C. B. (2000). "Biología y aprovechamiento de *Agave lechuguilla* Torrey", *Botanical Sciences*, 67, 75-88.
- RIVERA-HERNÁNDEZ, J. E., Flores-Hernández, N., Vargas-Rueda, A. F., Alcántara-Salinas, G., Cházaro-Basáñez, M. D. J., y García-Albarado, J. C. (2019). "Flora y vegetación de la región semiárida de Acultzingo-Maltrata, Veracruz, México", *Acta Botánica Mexicana*, 126, e1433.
- RODRÍGUEZ SAUCEDA, E. N., Rojo Martínez, G. E., Ramírez Valverde, B., Martínez Ruiz, R., Cong Hermida, M. C., Medina Torres, S. M., y Piña Ruiz, H. H. (2014). "Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) en México", *Ra Ximhai*, 10, 173-193.
- ROMERO, L. (2018). "Inventario de la riqueza del Valle de Tehuacán-Cuicatlán", *Gaceta UNAM*, 5, 221.

- ROMERO, A., Luna, M., y García, E. (2014). “Factores físicos que influyen en las relaciones florísticas de los piñonares (*Pinaceae*) de San Luis Potosí, México”, *Revista de Biología Tropical*, 62, 795-808.
- RZEDOWSKI, J. (2006). *Vegetación de México*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. [Primera edición digital].
- RZEDOWSKI, J. (1991). “Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México”, *Acta Botánica Mexicana*, 14, 3-21.
- RZEDOWSKI, J. (1978). *Vegetación de México*. México: Limusa.
- RZEDOWSKI, J. (1973). “Geographical relationships of the flora of Mexican dry regions”, en A. Graham (ed.), *Vegetation and vegetational history of northern Latin America*. Ámsterdam, Países Bajos: Elsevier Scientific Publishing Co., 61-72.
- RZEDOWSKI, J. (1968). “Las principales zonas áridas de México y su vegetación”, *Bios. Revista del Seminario de Estudios Biológicos*, 1, 4-24.
- RZEDOWSKI, J. (1965). “Vegetación del estado de San Luis Potosí”, *Acta Científica Potosina*, 5, 1-291.
- SÁENZ-ROMERO, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., y Richardson, B. A. (2010). “Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation”, *Climatic Change*, 102(3), 595-623.
- SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, A. (2008). “Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México”, *Madera y Bosques*, 14, 107-120.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2010). “Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2010. Protección ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo”. Diario Oficial de la Federación, México.
- SHREVE, F., y Wiggins, I. L. (1964). *Vegetation and flora of the Sonoran Desert*, vol. 591. Stanford, California: Stanford University Press.
- SIH, A., Ferrari, M. C. O., y Harris, D. J. (2011). “Evolution and behavioural responses to human-induced rapid environmental change”, *Evolutionary Applications*, 4, 367-387.

- SOSA, V., Vásquez-Cruz, M., y Villarreal-Quintanilla, J. A. (2020). “Influence of climate stability on endemism of the vascular plants of the Chihuahuan Desert”, *Journal of Arid Environments*, 177, e104139.
- STINTZING, F. C., y Carle, R. (2005). “Cactus stems (*Opuntia* spp.): a review on their chemistry, technology, and uses”, *Molecular Nutrition & Food Research*, 49, 175-194.
- TIELBÖRGER, K., y Salguero-Gómez, R. (2014). “Some like it hot: are desert plants indifferent to climate change?”, *Progress in Botany*, 75, 377-400.
- TORRES-RODRÍGUEZ, E., Vallebuena-Estrada, M., González, J. M., Cook, A. G., Montiel, R., y Vielle-Calzada, J. P. (2018). “AMS dates of new maize specimens found in rock shelters of the Tehuacán Valley.”, *Radiocarbon*, 60, 975-987.
- United Nations Environment Management Group (2011). *Global drylands: a UN systemwide response*. Ginebra, Suiza.
- VICENTE-SERRANO, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., y Sánchez-Lorenzo A. (2013). “Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 52-57.
- VILLARREAL-QUINTANILLA, J. A., Bartolomé-Hernández, J. A., Estrada-Castillón, E., Ramírez-Rodríguez, H., y Martínez-Amador, S. J. (2017). “El elemento endémico de la flora vascular del Desierto Chihuahuense”, *Acta Botanica Mexicana*, 118, 65-96.
- VILLASEÑOR, J. L., Dávila, P., y Chiang, F. (1990). “Fitogeografía del valle de Tehuacán-Cuicatlán”, *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 50, 135-149.
- WARD, D. (2009). *The biology of deserts*. Oxford: Oxford University Press.
- WILLMER, P., Stone, G., y Johnston, I. (2000). *Environmental physiology of animals*. Malden, MA, EE. UU.: Blackwell Publishing.
- ZARAZÚA-CARBAJAL, M., Chávez-Gutiérrez, M., Romero-Bautista, Y., Rangel-Landa, S., Moreno-Calles, A. I., Ramos, L. F. A., Smith, S. E., Blancas, J., del Val, E., Arizmendi, M. C., y Casas, A. (2020). “Use and management of wild fauna by people of the

Tehuacán-Cuicatlán Valley and surrounding areas, Mexico”,
Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 16, 4.

ZÚÑIGA, B., MALDA, G., y SUZÁN, H. (2005). “Interacciones planta-no-
driza en *Lophophora diffusa* (Cactaceae) en un desierto subtropical
de México”, *Biotropica*, 37, 351-356.

CAPÍTULO 2
LA MODULACIÓN DEL FITOBIOMA
CÓMO HACER FLORECER EL DESIERTO
SIN OCASIONAR UN DESASTRE ECOLÓGICO

ANA SOFÍA RAMÍREZ-PELAYO¹
ALFREDO RAMÍREZ-HERNÁNDEZ²
JORGE VERDÍN¹

RESUMEN

Las tecnologías de la revolución verde hicieron posible el aumento de la productividad agrícola que permitió alimentar a una población creciente. Sin embargo, el desarrollo del riego artificial y la aplicación sistemática de agroquímicos demostraron ser ecológicamente contraproducentes y, en ciertos contextos, económicamente inviables. El entendimiento creciente de las relaciones que mantiene una planta con los componentes bióticos (virus, bacterias, hongos, insectos, y otras plantas) y abióticos (suelo, clima) de su entorno (fitobioma) prometen cambiar la tecnología agrícola para hacerla al menos tan productiva como la actual, pero económica y ecológicamente sostenible y, además, lo suficientemente flexible para enfrentar los desafíos del cambio climático. En este capítulo se exponen de manera general los últimos avances en el conocimiento del fitobioma, su aspiración a predecir el comportamiento de la planta y su entorno ante varios escenarios, y cómo se podría utilizar

¹ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (Ciatej). Camino Arenero 1227, Col. El Bajío del Arenal, C.P. 45019, Zapopan, Jalisco, México.

² CONAHCYT / Ipcyt-División de Ciencias Ambientales. Camino a la Presa San José 2055. Col. Lomas 4ª. sección. C.P. 78216. San Luis Potosí, S.L.P., México. Autor para la correspondencia: jverdín@ciatej.mx

este conocimiento para generar una agricultura sostenible en las zonas áridas.

PALABRAS CLAVE: revolución verde, cambio climático, zonas áridas, biología de sistemas, microbioma, modelado matemático, biofertilización.

INTRODUCCIÓN

Las zonas áridas ocupan entre el 41 y 47% de la superficie de la tierra y se estima un incremento del 4.3-11.2% en los próximos años debido al cambio climático (Koutroulis, 2019; Middleton y Sternberg, 2013). Por lo anterior, cultivar las tierras áridas es cada vez más necesario para satisfacer la demanda creciente de alimentos de la numerosa población que las habita. La agricultura en el desierto es un reto extraordinario que, bajo el esquema de las tecnologías agrícolas actuales, sólo es viable a un alto costo ecológico y económico (Gewin, 2010).

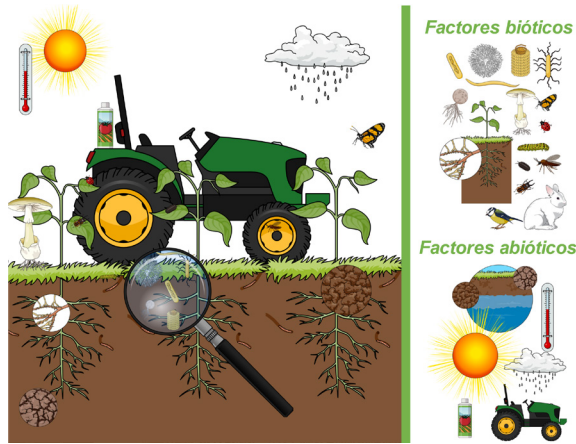
La agricultura está experimentando una revolución conceptual que ofrece llevarla a la *sostenibilidad*,¹ darles viabilidad a zonas bioclimáticamente poco favorables, como las áridas, y dotarla de herramientas que le permitan adaptarse oportunamente al cambio climático. Esta revolución no es la actualización de la verde, sino un cambio genuino centrado en un concepto de reciente creación: el fitobioma (Morrissey *et al.*, 2004). Éste se define como el sistema integrado por un cultivo y los *factores bióticos* (virus, bacterias, hongos, amebas, nemátodos, insectos y otros animales, así como las plantas vecinas) y *abióticos* (clima, suelo) con los que interactúa, además de las *prácticas agronómicas* asociadas (figura 1) (Bell *et al.*, 2019).

La identificación, entendimiento y cuantificación de las relaciones dinámicas entre los componentes del fitobioma permitiría modelar matemáticamente el sistema y predecir su comportamiento cuando cambie uno de sus componentes (figura 2) (Ke *et al.*, 2020). Estos modelos serían útiles para la optimización del riego, el diseño de esquemas ambientalmente amigables de biofertilización y biocontrol utilizando microorganismos e insectos naturalmente asociados al cultivo, así como modificar las prácticas agronómicas para desplazar al sistema en la dirección apropiada.

En la actualidad, el fitobioma ofrece soluciones conceptuales para la nueva agricultura, pero aún estamos lejos de llevar al campo las primeras. Sin embargo, ya hay algunas en el mercado que explotan la relación entre al menos dos componentes del sistema, como el caso notable de los biofertilizantes (Arif *et al.*, 2020; Lakshmanan *et al.*, 2017). En el

¹ Todas las palabras en cursivas están definidas en el glosario.

FIGURA 1

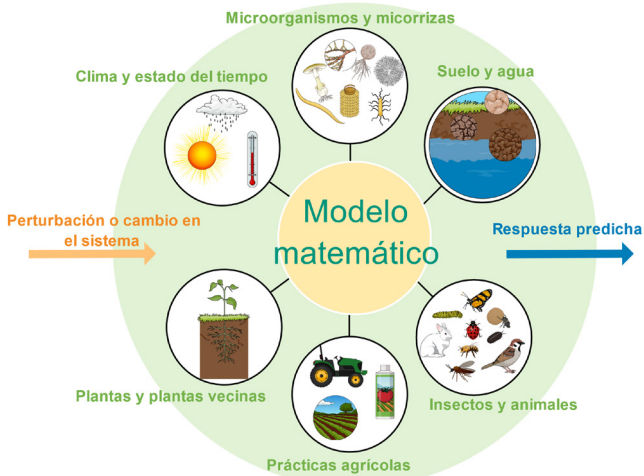


Diversos seres vivos y fenómenos naturales influyen directamente en las especies vegetales con las que están en contacto; a esto se le conoce como fitobioma. Los factores con los que interactúa la planta pueden clasificarse como bióticos (entre los que se pueden encontrar bacterias, hongos y micorrizas, oomicetos, amebas, nematodos, insectos, animales y otras plantas vecinas) y abióticos (que comprenden el suelo, agua, estado del tiempo, clima y las prácticas agrícolas).
Fuente: Elaboración propia.

contexto del cambio climático, numerosos estudios han analizado los efectos del calentamiento global y la sequía en las plantas, en las comunidades microbianas del suelo y en los insectos (Johansson *et al.*, 2020; Raven y Wagner, 2021; Sánchez-Bayo y Wyckhuys, 2019), así como las estrategias de mitigación que todos ellos desarrollan individual o colectivamente (Menéndez, 2007; Menzel y Feldmeyer, 2021). Esta información son los datos “semilla” que permitirán modelar el fitobioma y generar soluciones para una agricultura sostenible en las zonas áridas de México adaptada a los retos que impone el cambio climático.

En este capítulo se revisan los efectos de la revolución verde, los desafíos del cambio climático y la creciente desertificación en México como preámbulo para justificar una agricultura inteligente y sostenible basada en la manipulación del fitobioma. Además, se discute con una perspectiva integradora, sencilla y directa el conocimiento más reciente sobre los efectos del calentamiento global y la sequía en las plantas y los microorganismos e insectos que interactúan con ellas, pues son la fuente

FIGURA 2



Los componentes del fitobioma se relacionan e interaccionan entre sí para formar un sistema integral que puede describirse mediante un modelo matemático.

Este modelo permite predecir el comportamiento del sistema cuando uno de sus componentes cambia o hay perturbación en el mismo.

Fuente: Elaboración propia.

primaria de datos para el modelamiento de la dinámica del fitobioma. Finalmente, se exploran las bases del modelamiento del fitobioma y se discute el desarrollo de la próxima generación de biofertilizantes como un caso de lo que el modelado del fitobioma permitiría hacer.

LOS EFECTOS DE LA AGRICULTURA BASADA EN LA REVOLUCIÓN VERDE Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA AGRICULTURA DE LAS ZONAS ÁRIDAS DE MÉXICO

La agricultura en México puede ser de subsistencia o intensiva comercial (Bamford *et al.*, 2021). La primera se caracteriza por trabajar pequeñas parcelas con pocas herramientas, labor intensiva y poco capital, y que produce lo suficiente para el consumo del agricultor y su familia. La segunda se caracteriza por el uso de las prácticas agrícolas de la revolución verde (véase abajo). La agricultura intensiva se distribuye

mayoritariamente en tres regiones del país: la región tropical de la costa del golfo de México y Chiapas, la región de la Mesa Central en el Bajío, y las tierras irrigadas del norte y noroeste; estas últimas comprenden gran parte de las zonas áridas del país (Bamford *et al.*, 2021). A grandes rasgos, la revolución verde consistió en un paquete tecnológico, derivado de la intensificación del capital, caracterizado por la mecanización de procesos (uso de tractores, sembradoras, sistemas de irrigación), uso de agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas) y desarrollo y cultivo casi exclusivo de variedades vegetales mejoradas que permitió el incremento de la producción agrícola mundial en respuesta al incremento poblacional global durante la segunda mitad del siglo XX (Phillips, 2014; Pingali, 2012). Desde los comienzos de la agricultura intensiva con el desarrollo de variedades enanas de trigo (que eran más productivas y resistentes al estrés) en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en México, por Norman E. Borlaug, ésta se ha enfocado en obtener mayores rendimientos para satisfacer los mercados domésticos y de exportación. Sin embargo, esta agricultura requiere un abundante uso de agua, lo que ejerce mucha presión sobre los recursos hídricos, principalmente de pozos profundos, ríos y presas; que se agudiza en zonas áridas o secas al ser dependientes del riego (Inegi, 2021; SIAP, 2021).

GLOSARIO

Antagonista	Interacción entre organismos de diferentes especies en la que una se beneficia a expensas de otra.
Bacterias Gram-negativas	Bacterias que contienen una membrana externa con un alto contenido de lipopolisacáridos (LPS); se tiñen de rosa durante la prueba de tinción de Gram.
Bacterias Gram-positivas	Bacterias que contienen una gruesa capa de peptidoglicanos y complejos de ácido murámico; se tiñen de violeta o azul oscuro durante la prueba de tinción de Gram.
Bioindicador	Organismo vivo que sirve para evaluar el nivel de contaminación en un ecosistema, en el aire o el agua.
Edáfica	Perteneciente o relativo al suelo.
Entomofauna	Conjunto de insectos en un ambiente o región.
Escorrentía	Agua de lluvia que corre sobre una superficie o terreno.
Estocástico	Que está sujeto al azar.

GLOSARIO

(continuación)

Evapotranspiración	Pérdida de agua por evaporación de la contenida en el suelo y por transpiración de las plantas.
Factores abióticos	Los factores naturales no vivos y su influencia en el ambiente en el que existen; p. ej., el clima, el suelo o la disponibilidad del agua, y que determinan la disponibilidad de nutrientes y el potencial para la producción de alimentos.
Factores bióticos	Cualquier organismo vivo y su influencia en el ambiente en el que se encuentra.
Fenotipo	Rasgos físicos, bioquímicos y del comportamiento que son observables en un organismo que son resultado de su genotipo y del ambiente que lo rodea.
Filosfera	Región aérea de la planta que está colonizada por microorganismos, llamados epífitos.
Genotipo	Conjunto de genes de un organismo.
Interacciones multitróficas	Relaciones entre diversas especies a lo largo de los distintos niveles tróficos y que influyen en la ecología y evolución del ecosistema.
Micelial	Crecimiento micelial; crecimiento vegetativo en hongos que se caracteriza por una masa de células tubulares y ramificadas llamadas hifas.
Microbioma	Conjunto de microorganismos en un lugar específico, es decir, la microbiota de dicho entorno.
Mutualista	Interacción entre organismos de diferentes especies que provee beneficios para los individuos involucrados.
Ontogenia	Desarrollo de un organismo, o sistema dentro del mismo, a lo largo de todo su ciclo de vida.
Potrero monófito	Terreno delimitado en el que se alimenta y guarda el ganado en el que crecen plantas de una sola especie.
Rizosfera	Área dinámica que rodea a las raíces de una planta y que está habitada por una comunidad única de microorganismos influenciada por exudados de las mismas raíces; las propiedades químicas, físicas y biológicas de la rizosfera cambian a lo largo y radialmente en torno a la raíz.
Sostenibilidad	Cualidad del desarrollo en el que se aseguran las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las de las siguientes.

Las zonas áridas son regiones que se caracterizan por escasa precipitación, altas temperaturas y altas tasas de *evapotranspiración*, baja humedad y

vegetación escasa (Tchakerian, 2015). En México, las zonas con algún grado de aridez cubren alrededor del 65.3% del territorio nacional y albergan aproximadamente al 41% de la población (Díaz-Padilla *et al.*, 2011) en estados como Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas y Zacatecas, así como algunas zonas de Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla y Guerrero (Semarnat, 2021; SIAP, 2021).

Las zonas áridas son ecosistemas productivos y económicamente relevantes. Su vegetación nativa puede aprovecharse como fuente de polímeros, como la cera de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) y el hule a partir de guayule (*Parthenium argentatum*); de fibras, como la de lechuguilla (*Agave lechuguilla*), palma zamandoque (*Yucca carnerosana*) y zamandoque (*Hesperaloe funifera*) y de madera para la construcción o uso combustible, como mezquite (*Prosopis laevigata* y *P. juliflora*) (González-Medrano, 2012). En estas regiones se produce la mayor parte de granos de trigo y sorgo, forrajes de maíz y avena, y frijol del país, así como otros productos de alto consumo, como uva, alfalfa, tomate rojo, cebolla, chile verde y algodón (Inegi, 2021; SIAP, 2021).

La agricultura intensiva derivada de la revolución verde permitió alimentar a miles de millones de personas alrededor del mundo. Los precios de los alimentos se redujeron, por lo que el poder adquisitivo del consumidor aumentó y de esta manera se contribuyó a la disminución de la pobreza (Pingali, 2012; Pinstруп-Andersen y Hazell, 1985). En un inicio, también previno la conversión de tierras forestales en campos de cultivo al aumentar el rendimiento de los espacios agrícolas ya existentes (Pingali, 2012). México pasó de producir 1.6 millones de toneladas de maíz, 97 000 toneladas de frijol y 464 000 toneladas de trigo, y de importar alimentos en 1940, a producir 14.1 millones de toneladas, 1.5 millones de toneladas y 5.2 millones de toneladas, respectivamente, en 1985, lo que incluso permitió su exportación (Sonnenfeld, 1992). Sin embargo, hubo consecuencias negativas en el sector agrícola. La agricultura tecnológica desplazó sistemas tradicionales de producción desarrollados localmente, adaptados al ecosistema circundante y con pocos insumos, que, además de proveer alimentos, ofrecían servicios sociales y ambientales (Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer, 2018). El cultivo de variedades de alto rendimiento redujo la agrobiodiversidad de la tierra, lo que modificó la

composición y dinámica de animales, plantas y microorganismos involucrados en los procesos agrícolas y, en consecuencia, en la producción de alimentos (Qualset y Shands, 2005).

De manera general, la producción agrícola en México ha seguido una tendencia al alza. Sin embargo, uno de los principales problemas que enfrentan los agricultores hoy en día es la degradación de la fertilidad del suelo debido a las prácticas agrícolas intensivas. Para mejorar la calidad del suelo, ha sido necesario invertir en más insumos (agroquímicos), cuyo costo también es significativo (Inegi, 2021; SIAP, 2021). Sin embargo, el uso excesivo de estas sustancias y el manejo inadecuado de la tierra (por ejemplo, labranza continua y práctica de quemas) ha agravado la condición del suelo, por lo que no sólo se han requerido mayores cantidades de agroquímicos para mantener su productividad, sino también extender la frontera agrícola hacia otros ecosistemas para sostener los rendimientos (Báez-Pérez *et al.*, 2017). Además de los suelos, los cuerpos de agua también han sido contaminados debido al arrastre de los agroquímicos desde las tierras de cultivo hacia ellos por el drenaje agrícola. En México, por ejemplo, se han detectado restos de pesticidas, muchos de ellos persistentes, en diversos ríos (Leyva-Morales *et al.*, 2017).

La contaminación del agua y su uso intensivo han agotado los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Esto afecta en particular a las zonas áridas debido a su escasa precipitación y poca agua disponible. La explotación de los acuíferos de la región se realiza en gran parte para los sistemas de riego de cultivos intensivos, superando incluso la capacidad de recarga de los mismos (Gámez *et al.*, 2014; Noyola-Medrano *et al.*, 2009; Rivera, 2016). Asimismo, el riego excesivo ha salinizado los suelos, que en zonas áridas impide el adecuado drenaje del agua a través de la tierra al producir un fenómeno de acumulación de sales de sodio por las altas temperaturas características de la región.

La modificación de la cobertura vegetal por las actividades agrícolas y pecuarias de la región ha reducido la biodiversidad y erosionado el suelo. Esto ha provocado que las zonas áridas se degraden por un proceso de desertificación (González-Medrano, 2012) incluso hasta un punto irreversible (Granados-Sánchez *et al.*, 2013). La productividad biológica, y por lo tanto económica, de estas regiones ha disminuido por la sobreexplotación, la erosión del suelo debida al riego y el viento, el deterioro de

sus propiedades físicas, químicas y biológicas a causa de la salinización, la reducción de materia orgánica y la pérdida de vegetación a largo plazo, así como la acumulación de moléculas tóxicas a partir de agroquímicos (Granados-Sánchez *et al.*, 2013; López-Santos, 2016).

Los efectos del cambio climático han exacerbado esta problemática. Desde los años 60 (Met Office, 2011), se ha observado un calentamiento gradual en todo el territorio mexicano, con aumento en la temperatura promedio de 0.85°C, y se espera que ésta incremente alrededor de 4°C en la frontera norte y 2.5-3.5°C en el resto del país. Los patrones de precipitación regionales han cambiado. La ocurrencia e intensidad de fenómenos meteorológicos como ciclones tropicales, sequías e inundaciones, y siniestros asociados, como incendios de alta intensidad, han aumentado. México es especialmente vulnerable a los efectos del cambio climático ya que la agricultura es la actividad principal del sector primario (Inegi, 2021), y esta actividad es sensible a los patrones climáticos cambiantes e irregulares por la naturaleza intrínseca de las plantas. El cambio climático impacta directamente en la productividad de las cosechas al modificar el volumen y la distribución espacial de la precipitación, lo que vuelve especialmente susceptibles a los cultivos de temporal y de subsistencia. Se estima que la productividad de algunos cultivos importantes como el maíz, papa, frijol, trigo y sorgo (los tres últimos producidos principalmente en zonas áridas) (SIAP, 2021) disminuya a medida que se incremente la temperatura. Asimismo, se espera que se modifique la duración de los ciclos de desarrollo de las cosechas (ciclo fenológico) y de las sequías (Romero *et al.*, 2020).

En la actualidad, se busca desarrollar medidas de mitigación y adaptación para enfrentar los efectos del cambio climático (FAO, 2021). Las medidas de mitigación involucran la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante el uso de energías renovables, la eficiencia de procesos existentes y el incremento de los sumideros de carbono (Casiano-Domínguez *et al.*, 2018; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018). De manera particular, en la agricultura estas medidas corresponden al desarrollo de sistemas agroforestales, en los que se asocia la producción agrícola a árboles aprovechables, como es el caso del café o el cacao (Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer, 2018). Las medidas de adaptación conllevarán la modificación de la gestión de recursos naturales para ajustarse a

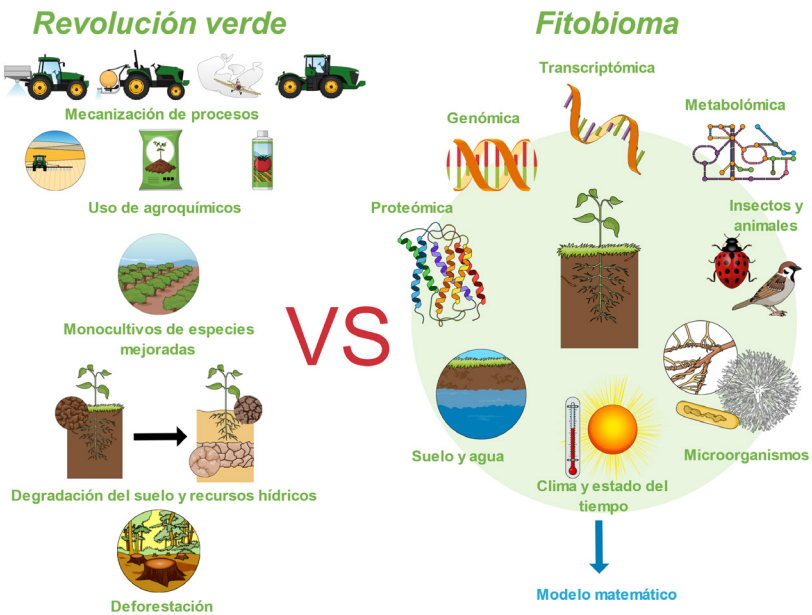
los efectos del cambio climático. En la agricultura esto podría llevarse a cabo mediante la modificación de las fechas de siembra, el desarrollo de variedades más resistentes a las condiciones esperadas, la rotación de cultivos, la construcción de invernaderos, el uso de composta como fertilizante y el manejo racional del recurso hídrico (Conde *et al.*, 2006).

En zonas áridas se han explorado diversas alternativas de adaptación. Una de ellas es el establecimiento de zonas de veda para restringir la extracción de agua subterránea, hacer eficiente su uso actual y redistribuir los derechos intersectoriales asociados a ella (Rivera, 2016). Se ha sugerido adoptar prácticas de agricultura comercial a pequeña escala, identificar cultivos tradicionales y rehabilitar tierras para cultivos orgánicos (Gámez *et al.*, 2014). Asimismo, se han identificado y desarrollado variedades resistentes a estrés hídrico, por ejemplo, de albahaca y frijol (Ojeda-Silvera *et al.*, 2015; Pedroza-Sandoval *et al.*, 2015), y a estrés salino, como alfalfa para forraje (González-Romero *et al.*, 2011). Se busca aprovechar al huizache y mezquite en sistemas agroforestales de mitigación como árboles de uso múltiple que sean fuentes de goma industrial, miel y carbón, así como restauradores de erosión y fijadores de nitrógeno (Reséndiz-Flores *et al.*, 2016). A la par, se busca detener y revertir el proceso de desertificación. Es necesario evaluar, diseñar o adecuar prácticas de manejo y uso de suelos mediante estrategias y tecnología adaptadas a condiciones áridas, desarrollar políticas agrícolas sostenibles que incluyan el uso racional de agua y energía y la conservación de la flora nativa, y finalmente integrarlas en planes de desarrollo (Granados-Sánchez *et al.*, 2013; López-Santos, 2016).

Es claro que la agricultura intensiva derivada de la revolución verde ya no es una opción factible y sostenible de producción agrícola. Es preciso encontrar una alternativa que, además de ser capaz de alimentar a una población mundial creciente, no conlleve el sacrificio de los ecosistemas y recursos naturales en un mundo cada vez más amenazado por el agotamiento de éstos y el cambio climático. El fitobioma tiene el potencial de abordar esta problemática desde una perspectiva que considera a la producción agrícola como un sistema integral y dinámico, susceptible a su entorno y resultado de la interacción de diversos componentes biológicos y climáticos. El estudio del fitobioma en un agrosistema específico puede esclarecer la influencia de estos aspectos y cómo se interrelacionan

en cierto contexto, lo que permitiría integrar esta información en un modelo matemático capaz de predecir el resultado de una perturbación o un cambio en algún componente. Por tanto, la agricultura derivada del conocimiento del fitobioma permitiría tomar decisiones informadas y sostenibles respecto a las prácticas agrícolas que se han de aplicar, basadas en el entendimiento integral de toda la dinámica compleja que influye en la producción agrícola, a diferencia del uso indiscriminado de la tecnología de las prácticas intensivas derivadas de la revolución verde (figura 3). Dado que el estudio del fitobioma en un contexto agrícola específico puede ofrecer una solución adecuada para él, éste podría ser una valiosa alternativa para ecosistemas frágiles, como son las zonas áridas mexicanas.

FIGURA 3



La revolución verde y el fitobioma. La revolución verde se enfocó en obtener una gran productividad agrícola por medio de la introducción de variedades vegetales mejoradas, irrigación artificial y aplicación de fertilizantes químicos y pesticidas, lo que causó la degradación de los recursos (suelo, agua, etc.). El fitobioma considera todos los factores que afectan a la planta y estima su efecto en un modelo matemático que se puede utilizar para estimar la ocurrencia de un evento esperado o deseado a partir de una modificación del sistema o una perturbación del mismo.

Fuente: Elaboración propia.

EL ORIGEN DEL CONCEPTO DE FITOBIOMA

Durante la mayor parte del siglo XX, la ciencia aspiró a entender los fenómenos de la naturaleza dividiéndolos en partes sencillas, asumiendo que la suma del conocimiento adquirido sobre las partes llevaría a entender el todo más complejo (reduccionismo científico). Sin embargo, hace pocos años se comprendió que los sistemas complejos, en particular los biológicos, como la agricultura, tienen propiedades que no pueden estudiarse si son divididos en partes sencillas (Tavassoly *et al.*, 2018; Westerhoff y Hofmeyr, 2005). Con el propósito de identificar y entender dichas propiedades, surgió la biología de sistemas, la cual utiliza herramientas de alto desempeño como la genómica, transcriptómica, proteómica, metabolómica (herramientas-ómicas) (cuadro 1), y sus versiones meta (metagenómica, metatranscriptómica, etc., es decir, las que determinan los genomas y transcriptomas de comunidades completas). La información generada con esas herramientas permitiría modelar matemáticamente las relaciones entre las partes del sistema para hacer inferencias de su comportamiento a partir del estado de alguna de ellas (figura 2) (Tavassoly *et al.*, 2018). Esta visión sistémica se ha aplicado en las ciencias médicas, donde ha permitido la generación de una gran cantidad de conocimiento a partir del análisis del estado pre, durante y posenfermedad de numerosos pacientes, con el que se ha podido prescribir acciones preventivas para que un individuo no caiga enfermo según su estado de salud en un momento dado. La biología de sistemas facilitó la transición de la medicina reactiva a la proactiva (Son *et al.*, 2020).

CUADRO 1
HERRAMIENTAS -ÓMICAS

Genómica	Estudio de la estructura, función y herencia del genoma, o material genético completo, de un organismo.
Transcriptómica	Estudio del nivel de expresión de genes mediante la cuantificación de ARN mensajero y ARN no codificante en una célula.
Proteómica	Estudio de la distribución de proteínas en una célula.
Metabolómica	Estudio de la naturaleza y la trayectoria que sigue la transformación de moléculas a través de vías bioquímicas.

Estas herramientas permiten estudiar grandes conjuntos de moléculas biológicas simultáneamente y trabajar con los abundantes datos resultantes, por lo que se les denomina de alto rendimiento.

La agricultura est1 experimentando el mismo cambio. Si bien la revoluci3n verde introdujo tecnolog1as que permitieron resolver la demanda de alimentos de una poblaci3n creciente, esas tecnolog1as demostraron ser insuficientes para conseguir sus objetivos (M3ndez Rojas, 2017), ser ambientalmente muy costosas y, en ciertos contextos, completamente inviables (Ceccon, 2008). En la actualidad, la agricultura aspira a un cambio similar al de la medicina (agricultura proactiva, no paliativa) en el que, adem1s de mantener la productividad de las tecnolog1as de la revoluci3n verde, se procure inocuidad ambiental y adaptabilidad al cambio clim1tico. Esto ser1a posible mediante la manipulaci3n del fitobioma, concepto que emana directamente de la biolog1a de sistemas. El concepto del fitobioma fue propuesto al comprender la imposibilidad de seguir incrementando la productividad agr1cola atacando de manera focalizada s3lo uno de los componentes del sistema (como el suelo), sino que habr1a que considerarlo en su totalidad (Beans, 2017; Bell *et al.*, 2019). Por lo anterior, es necesario caracterizar la compleja red de interacciones entre todos los componentes del fitobioma y modelarla matem1ticamente para predecir el comportamiento del sistema cuando cambia un componente (figura 2) (Beans, 2017; F1bregas *et al.*, 2019). De este modo ser1a posible incrementar la productividad del cultivo a la par que se optimizan las estrategias de fertilizaci3n y uso de agua, y se aplican estrategias para prevenir plagas y enfermedades. El concepto del fitobioma ofrece una oportunidad para una agricultura sostenible en las zonas 1ridas, carentes casi siempre de agua, con suelos pobres y frecuentemente salinos. Adem1s, el fitobioma ofrece un marco conceptual flexible que permitir1a hacer frente al cambio clim1tico. En la siguiente subsecci3n, se presenta una visi3n panor1mica de los componentes del fitobioma y de su respuesta fisiol3gica a la sequ1a.

LAS RELACIONES CIRCULARES DE LOS COMPONENTES DEL FITOBIOMA

Los componentes del fitobioma (clima, suelo, planta, microorganismos, insectos, etc.) se influyen de forma mutua (Cavicchioli *et al.*, 2019; Vries *et al.*, 2020), incluso en casos donde la intuici3n indicar1a que uno de ellos es predominante, como el clima.

El clima. Este componente del fitobioma, si bien influye enormemente en el comportamiento de los otros, también es influido, por ejemplo, por las comunidades microbianas del suelo. Un ejemplo de esto, aunque no relacionado con las zonas áridas, son las comunidades microbianas del permafrost (suelos congelados) de las tundras. Debido al calentamiento global, el permafrost ha empezado a descongelarse, así como las comunidades microbianas que allí se encuentran. En dichas comunidades existen bacterias metanogénicas que pueden contribuir al efecto invernadero debido al metano que producen, lo que aceleraría el calentamiento global (Johnston *et al.*, 2019). Éste es un ejemplo claro de la circularidad de las relaciones entre los miembros del fitobioma.

Como ya se mencionó, se prevé que el sector agrícola será uno de los más afectados por el cambio climático debido al incremento de la temperatura media y el cambio en el patrón de las precipitaciones pluviales (Cavicchioli *et al.*, 2019; Gay *et al.*, 2006; Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 1998). La producción agrícola disminuirá por la reducción del ciclo fenológico de los cultivos, la irregularidad de las lluvias y el aumento de la presión de plagas y enfermedades sobre las plantas, sobre todo a mediano y largo plazo (Cervantes *et al.*, 2014; Gillespie *et al.*, 2018; Gornall *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2019; Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011). Este pronóstico parte de una perspectiva macroclimática (es decir, que considera el clima de grandes regiones); sin embargo, se ha observado que los microclimas son más influyentes en la regulación de la fisiología, salud y productividad vegetal. Los microclimas pueden generarse bajo las copas de los árboles y constituyen un ambiente amortiguador de los efectos del cambio macroclimático en la planta misma, así como en los microorganismos y herbívoros con los que la primera interacciona (Cavicchioli *et al.*, 2019; Zellweger *et al.*, 2020). La generación de microclimas es una estrategia que, además de mitigar, dentro de ciertos límites, los efectos del cambio climático, podría ser una opción para zonas áridas donde podrían usarse árboles para la generación de un microclima adecuado.

El suelo y su microbioma. El suelo contiene uno de los *microbiomas* más diversos sobre la Tierra, por lo que éste es la fuente principal de los microorganismos con los que la planta integra sus propios microbiomas. Las características fisicoquímicas del suelo, incluido el contenido

de agua, influyen directamente en la composici3n y din3mica de sus comunidades microbianas, y de forma indirecta en las comunidades asociadas a la planta. Contraintuitivamente, la influencia del suelo en la integraci3n de los microbiomas asociados a las plantas es mayor que la del *genotipo* y el estadio del desarrollo de la propia planta. Genotipo y estadio del desarrollo parecen seleccionar en espec3fico a los miembros del microbioma vegetal (Andrew *et al.*, 2012; Bahram *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019; Strickland *et al.*, 2015). La influencia de la planta en la integraci3n de sus microbiomas, que de ning3n modo es menor, se da por medio de los exudados radiculares. 3stos est3n integrados por amino3cidos, az3cares, 3cidos grasos, 3cidos org3nicos y metabolitos secundarios, cuya composici3n puede cambiar en funci3n del estadio del desarrollo, las condiciones nutricionales y el estr3s que percibe la planta. Los exudados radiculares satisfacen las necesidades metab3licas de especies microbianas particulares, lo que las enriquece activamente en las ra3ces en crecimiento (Bakker *et al.*, 2018; Mao *et al.*, 2014; Zhahlnina *et al.*, 2018).

Los microbiomas del suelo son muy sensibles a las variaciones estacionales y se prev3 que ser3n muy afectados por el cambio clim3tico, principalmente por la alteraci3n de las temperaturas medias y el cambio en el patr3n de precipitaciones pluviales (Bahram *et al.*, 2018; Cavicchioli *et al.*, 2019; Johnston *et al.*, 2019). La alteraci3n de los microbiomas del suelo por el cambio clim3tico y la creciente desertificaci3n tendr3 un impacto significativo en la relaci3n planta-microorganismo con efectos en la productividad agr3cola (Berdugo *et al.*, 2020; Ochoa-Hueso *et al.*, 2018). Experimentalmente se ha observado que un calentamiento moderado dentro de un r3gimen de precipitaciones constantes puede inducir un incremento del 150% en la abundancia de las bacterias del suelo a cambio de una reducci3n de su diversidad. Sin embargo, si el calentamiento se acompa1a de sequ3a, como ser3a el caso de las zonas 3ridas, esas poblaciones pueden reducirse hasta 80% (Rocca *et al.*, 2018; Sheik *et al.*, 2011). Bajo condiciones de sequ3a, las bacterias *Gram-positivas* tienden a enriquecerse ya que tienen una *pared celular* m3s resistente y tienen las capacidades metab3licas para degradar sustratos complejos (Fuchslueger *et al.*, 2014). Por otro lado, las bacterias *Gram-negativas* incrementan su abundancia, en particular las de los filos *Proteobacteria* y *Bacteroidetes*, cuando aumenta el contenido de agua del suelo despu3s de

un periodo de sequía (Chen *et al.*, 2019). En contraste, las comunidades fúngicas del microbioma generalmente son menos sensibles a la sequía, pues además de contar con una pared celular resistente y la capacidad de metabolizar sustratos complejos, su crecimiento *micelial* les permite aprovechar islas de nutrientes y humedad (véase abajo *La planta y los hongos micorrízicos*) (Bhattacharjee *et al.*, 2020).

Después de un periodo de sequía, la temporalidad de la recuperación de la humedad tiene efecto en la composición y estructura del microbioma del suelo (Chen *et al.*, 2019; Hammerl *et al.*, 2019). Además, se ha observado que el uso que tuvo el suelo antes de la sequía también es un factor que influye en la resiliencia de las comunidades microbianas (Bastida *et al.*, 2019; Jurburg *et al.*, 2018; Moreno *et al.*, 2019). Debido a un mayor contenido de materia orgánica que puede retener agua aun en sequía extrema, las comunidades microbianas de los suelos bajo regímenes de agricultura orgánica son más resilientes a la sequía que las de los suelos sometidos a agricultura intensiva (Jurburg *et al.*, 2018; Moreno *et al.*, 2019). Del mismo modo, los suelos irrigados impiden que sus microbiomas se adapten a un menor contenido de agua, disminuyendo su resistencia a la sequía (Moreno *et al.*, 2019).

La planta y los hongos micorrízicos. Como se mencionó en *El suelo y su microbioma*, las plantas seleccionan activamente la microbiota con la que se asocian, ya sea *rizosférica* o *filosférica*. Estas interacciones pueden tener un efecto estimulador del crecimiento de la planta (existe un tipo especial de bacterias que son justo eso, promotoras del crecimiento de la planta, o PGPB, por sus siglas en inglés), o un efecto supresor sobre un patógeno de la misma (Ou *et al.*, 2019).

Una de las interacciones más interesantes desde el punto de vista biológico y agrícola es la micorrízica, en la cual se establece una relación simbiótica entre las raíces de una planta, incluidas las especies cultivables, y un hongo. La primera provee carbono producto de la fotosíntesis al hongo micorrízico, mientras éste brinda a la planta minerales, agua y protección ante estresores bióticos y abióticos, de este último destaca la sequía (Bell *et al.*, 2021; Genre *et al.*, 2020; Rich *et al.*, 2021; Tedersoo *et al.*, 2020).

En un contexto de estrés hídrico, conspicuo en las zonas áridas, las plantas pierden agua, aumenta el estrés oxidativo, se altera la adquisición

de nutrientes y disminuye el ritmo de crecimiento (Ortiz *et al.*, 2015; Zou *et al.*, 2020). Sin embargo, en las plantas micorrícicas, las raíces y las hojas sufren una serie de cambios metabólicos, hormonales y fisiológicos de mediano y largo plazo que las ayudan a mitigar los efectos de la sequía (Bernardo *et al.*, 2019; Ruiz-Lozano *et al.*, 2016; Sánchez-Romera *et al.*, 2016). Entre los cambios observados están la protección del sistema fotosintético (Mathur *et al.*, 2019; Ruiz-Lozano *et al.*, 2016), la regulación de la apertura de estomas que aumenta la eficiencia del uso de agua y reduce el estrés oxidativo (Augé *et al.*, 2015; Cheng *et al.*, 2021); el incremento del diámetro, superficie y volumen de las raíces (Cheng *et al.*, 2021); el aumento de la absorción de amonio y la alteración del metabolismo de prolina y sacarosa (Cheng *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2020; Ortiz *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2017). Además, se incrementa la secreción de la maquinaria enzimática antioxidante (Huang *et al.*, 2017; Ortiz *et al.*, 2015; Zou *et al.*, 2015) y un cambio en la composición de ácidos grasos en las membranas de la raíz (Bernardo *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2019), lo que en conjunto contribuye a que la planta mitigue los efectos de la sequía.

Las micorrizas, además de mitigar el estrés hídrico en las plantas, ofrecen otro tipo de servicios ecológicos que podrían tener un gran impacto en la agricultura de las zonas áridas. Dado que las micorrizas forman una red común de micelio (CMN, por sus siglas en inglés) que conecta a un grupo de plantas, se convierte en un medio para la distribución de agua, carbono y nutrientes entre las plantas conectadas (Bell *et al.*, 2021; Fiorilli *et al.*, 2018; Pons *et al.*, 2020; Tedersoo *et al.*, 2020). Además, cuando una de las plantas de la red sufre un ataque por patógenos o herbívoros, puede emitir señales de alerta a través de la red que ponen en guardia metabólica a las otras plantas de la comunidad (Tedersoo *et al.*, 2020). La simbiosis micorrícica puede ser específica, por lo que las especies que forman micorrizas pueden tener una ventaja competitiva dentro de la comunidad de plantas (Bennett *et al.*, 2017).

De forma interesante, las hifas de los hongos micorrícicos pueden extenderse mucho más allá de la rizosfera. Allí, forman microambientes que permiten el enriquecimiento específico de bacterias que coadyuvan con el objetivo del hongo micorrícico. De este modo se forma una asociación tripartita donde la planta, el hongo y la bacteria salen beneficiados (Hashem *et al.*, 2016; Nuccio *et al.*, 2013; Reis *et al.*, 2021; Scheublin *et al.*, 2010).

Los insectos. Los artrópodos y particularmente los insectos (véase el capítulo 6) están involucrados en la dinámica del fitobioma tanto en la porción *edáfica* como en la parte superficial de las plantas, participando en una intrincada red de *interacciones multitróficas*. Dentro del complejo del fitobioma, los insectos establecen diferentes asociaciones que van desde las *mutualistas* hasta las *antagonistas*, en un gradiente determinado por la *ontogenia* de las especies. Estas relaciones condicionan en gran medida las propiedades o atributos del fitobioma (e.g., riqueza de especies, diversidad ecológica y funcional, resiliencia, estabilidad, etc.), con lo que inciden directamente en los sistemas productivos. En este sentido, entender las relaciones entre los insectos y otros componentes del fitobioma es crucial para la productividad de la agricultura. Además, se ha visto que en esta relación los insectos ayudan a las plantas a mitigar los efectos del cambio climático.

El suelo es el medio principal para el desarrollo de la agricultura, y además da sustento a un cuarto de la riqueza de especies en la Tierra, donde destaca la *entomofauna* edáfica por su diversidad, biomasa y funcionalidad (Bardgett y Putten, 2014; Wardle, 2006). Por lo tanto, si los suelos de uso agrícola conservan una mayor diversidad, biomasa y funcionalidad de especies, éstos serán más fértiles y productivos. En particular, los insectos edáficos son considerados un grupo *bioindicador* ya que permiten determinar la salud de todo el conjunto de especies o relacionarla con fenómenos visibles, como el cambio de hábitat (Moreno *et al.*, 2007). Además, la entomofauna edáfica cumple un papel crucial en los procesos biogeoquímicos al participar en la descomposición de la materia orgánica (cadáveres, madera, plantas, hojarasca, etc.), por lo que inciden en la mineralización del suelo y, por tanto, facilitan la adquisición de nutrientes y el crecimiento de las plantas (Heo *et al.*, 2019; Kagata y Ohgushi, 2012). Algunas especies de insectos edáficos, como es el caso del curculiónido (Coleoptera, Curculionidae) *Sitona discoideus*, han sido propuestas como ingenieros ecosistémicos pues, al colonizar el suelo, favorecen su porosidad y la infiltración de agua, disminuyendo la escorrentía (Ryalls *et al.*, 2016). Como consecuencia, las plantas que interactúan con este tipo de ingenieros ecosistémicos tienen mayor concentración de nitrógeno y son de mayor tamaño.

También se han reconocido a los escarabajos estercoleros (Coleoptera, Scarabaeidae) como elementos clave por su estrecha relación con

los sistemas naturales, agroganaderos y pastizales, donde su presencia ofrece servicios ecosistémicos, además de beneficios económicos a los productores (Nichols *et al.*, 2008). En términos generales, estos insectos depositan sus huevos en bolas nido elaboradas con el estiércol para posteriormente enterrarlas en el suelo, donde se desarrollará la larva hasta convertirse en un insecto adulto. Con esta acción mecánica de enterramiento del estiércol, los escarabajos contribuyen de manera significativa en la limpieza de los pastizales, potreros, bosques, selvas, desiertos, etc., por lo que reducen los gases de efecto invernadero emitidos por el estiércol y a la vez mejoran la cantidad de materia orgánica en el suelo e incrementan la cantidad de nutrientes (Nichols *et al.*, 2008).

Desde nuestro grupo de investigación hemos trabajado con *Canthon humectus* en la región semiárida de San Luis Potosí (México), especie que presenta una elevada abundancia relativa en el altiplano mexicano. Se ha observado que *C. humectus* es eficiente al remover más del 50% del estiércol disponible en el suelo en sitios donde se mantenía una vegetación heterogénea con plantas nativas, y el mismo patrón se ha observado en zonas donde había potreros monofitos, donde remueve cerca del 45% del estiércol. Asimismo, se ha observado que al enterrar el estiércol en el suelo aumentó la cantidad de materia orgánica, la concentración de nitrógeno y amonio, así como se incrementó de manera significativa la biomasa de las plantas. En este sentido, se ha documentado que ante escenarios de cambio climático la acción de los escarabajos estercoleros puede ayudar a mitigar el estrés en las plantas (Johnson *et al.*, 2016).

En el fitobioma se entreteje una enmarañada red de interacciones que modelan la forma en que se establecen las relaciones entre las plantas, microorganismos, polinizadores y herbívoros; sin embargo, este enfoque integrador ha sido escasamente abordado (Barber y Gorden, 2015). Ante la presencia de herbívoros consumidores de raíces, algunas plantas responden incrementando las cantidades de néctar floral y extrafloral con la finalidad de atraer más hormigas que patrullen sus ramas y así atacar a los herbívoros y favorecer la presencia de polinizadores (Dáttilo *et al.*, 2015). Además, se producen cambios en la química de las plantas que facilitan la producción de una mayor cantidad de metabolitos secundarios, los cuales servirán como defensa ante los herbívoros. Por otra parte, las plantas toman nitrógeno a través de sus raíces, sin embargo, las bajas concentraciones de

nitrógeno o la escasa actividad de la diversidad de insectos del suelo provocan la deficiencia de nitrógeno de la planta y alteran la biomasa de las raíces (Ryalls *et al.*, 2016). Estos cambios en la absorción de nitrógeno afectan las interacciones planta-herbívoros, y su impacto es clave para determinar la renovación de las especies vegetales (Borgström *et al.*, 2016).

INTEGRANDO EL FITOBIOMA: MODELADO DE LAS INTERACCIONES DE SUS COMPONENTES

El conocimiento de la naturaleza y dinámica de la intrincada red de interacciones entre los componentes del fitobioma es aún limitado. Sin embargo, partiendo de la premisa de que los agrosistemas conservan la plasticidad de los procesos ecológicos, sería posible manipularlos para maximizar su productividad y sostenibilidad (Bohan *et al.*, 2013). Como se mencionó antes, las estrategias actuales de aumento de la productividad agrícola están enfocadas en mejorar uno o pocos componentes del sistema (variedades mejoradas, fertilización, irrigación, etc.), lo que a la postre puede generar otros problemas. Esto subraya la necesidad de tener un enfoque integrado del agrosistema, como lo propone la idea del fitobioma, para predecir efectos basados en un modelo matemático de su comportamiento y poder manipularlo.

Desde hace más de dos décadas, el modelamiento de sistemas biológicos, entre ellos los agrícolas, es crecientemente necesario para comprender su complejidad. Sin embargo, a diferencia de los sistemas físicos, el modelado de los sistemas biológicos es uno de los retos científicos contemporáneos debido a que se carece de una base teórica sobre la cual construir los modelos (Louarn y Song, 2020; Pavé, 2006). Además, los sistemas biológicos están compuestos de numerosas entidades que interactúan entre ellas de manera no lineal, están jerárquicamente organizados, cambian a lo largo del tiempo y sus propiedades son difíciles de medir. También, el comportamiento de estos sistemas tiene un componente *estocástico* que no puede ser soslayado (Louarn y Song, 2020; Pavé, 2006). Al día de hoy, los modelos de agrosistemas son relativamente sencillos; por lo regular, sólo toman en consideración una especie, integran pocos procesos fisiológicos y la inclusión de interacciones con herbívoros

y microorganismos tiene un desarrollo incipiente (Donatelli *et al.*, 2017; Louarn y Song, 2020).

El modelado de un agrosistema debe ser guiado por el rendimiento, y éste puede ser influido por varios componentes del fitobioma, de tal manera que pueden definirse diversos tipos: 1) el rendimiento potencial, determinado por la radiación solar y la temperatura; 2) el rendimiento alcanzable, limitado por la disponibilidad de agua y nutrientes; y 3) el rendimiento propiamente dicho, mermado por las plagas, enfermedades y otros estresores ambientales. De este modo, la reducción del rendimiento es la diferencia entre el rendimiento alcanzable y el rendimiento propiamente dicho (Donatelli *et al.*, 2017). Reducir esta diferencia es el objetivo de la toma de decisiones agronómicas basadas en el modelado.

Al momento de generar un modelo del agrosistema, cada tipo de rendimiento tiene que ser parametrizado, es decir, descrito en términos numéricos. El rendimiento alcanzable puede ser fácilmente evaluado si se tiene un rendimiento de referencia en condiciones donde la planta no sufre estrés hídrico o nutricional. Por otra parte, la influencia de plagas y enfermedades puede ser estimada ligando los modelos preexistentes del comportamiento de plagas al modelo general (Donatelli *et al.*, 2017).

La teoría de redes aplicada a la ecología ha sido un tema en auge durante la última década, pues ofrece un marco conceptual que permite analizar la estructura de las comunidades por medio de sus interacciones bióticas. En sistemas complejos (aquellos estructurados por múltiples partes y niveles), como es el caso del fitobioma, las redes ecológicas entre las especies muestran patrones distintivos y repetitivos pudiendo identificar especies claves que pueden mantener la estabilidad de la comunidad (resiliencia) ante presiones ambientales (estrés hídrico, variaciones climáticas, actividades antrópicas, etc.). Algunos estudios realizados en comunidades naturales a lo largo del tiempo (Díaz-Castelazo *et al.*, 2010; Rico-Gray *et al.*, 2012), han demostrado que el análisis de redes permite apreciar el dinamismo de las especies cambiando su posición dentro de la comunidad. Incluso, se ha puesto de manifiesto que algunas especies invasoras logran posicionarse como especies núcleo dentro de la comunidad. Por tanto, el análisis de redes puede considerarse como una herramienta de síntesis que puede ser aplicada al estudio del fitobioma con la finalidad de hacer un seguimiento de las comunidades y poder

anticipar eventos perjudiciales para el agrosistema, como es la aparición de plagas (Bohan *et al.*, 2013).

Aunque las bases conceptuales para el modelado del fitobioma están en desarrollo, se cuenta con lo suficiente (vastas bases de datos meteorológicos y perfiles meta-taxonómicos de los microbiomas de suelo y rizosfera) para construir modelos parciales de los fitobiomas de zonas áridas que permitan hacer sostenible la agricultura en esas regiones.

MANIPULACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL FITOBIOMA: EL CASO DE LOS BIOFERTILIZANTES

Hoy en día, algunos de los componentes del microbioma son manipulados de manera aislada para producir un cambio en el agrosistema. El caso más notable, y base de la revolución verde, es el de las variedades vegetales mejoradas en las que alguno de sus atributos es potenciado, como la resistencia a la sequía, herbicidas, o plagas (Pardo-López *et al.*, 2013; Sedeek *et al.*, 2019). Sin embargo, desde una perspectiva sistémica, este tipo de mejoras suelen ser contraproducentes, ya que pueden, por ejemplo, fomentar la proliferación de algunos insectos o romper el equilibrio de otros dentro del ecosistema (Bohan *et al.*, 2013).

El microbioma rizosférico es otro de los componentes del fitobioma que con frecuencia es intervenido mediante biofertilizantes. El desarrollo futuro de los biofertilizantes además está claramente ligado al modelamiento y manipulación del fitobioma (Arif *et al.*, 2020). La explotación de la relación entre plantas y microorganismos para aumentar la productividad agrícola no es nueva. Desde hace mucho tiempo son conocidos los efectos benéficos de las bacterias fijadoras de nitrógeno (*Actinorhizobium* spp., *Azospirillum* spp., *Azotobacter* spp., *Rhizobium* spp.) o de las solubilizadoras de fósforo (*Bacillus megaterium*, *Bacillus mucilaginosus*), así como el de las micorrizas en la salud, promoción del crecimiento y productividad de los cultivos (Arif *et al.*, 2020; Gopal *et al.*, 2013). Numerosos inóculos radiculares que contienen uno o varios microorganismos están disponibles hoy en día en el mercado como biofertilizantes que complementan o sustituyen de modo parcial la fertilización inorgánica. Sin embargo, la efectividad de estos inoculantes es puesta en duda con

frecuencia. En el mejor de los casos, tienen una efectividad limitada o sólo son eficaces en especies determinadas cultivadas en regiones climatológicas definidas (Bakker *et al.*, 2012; Morrissey *et al.*, 2004).

Para mejorar los biofertilizantes, es necesario profundizar en los mecanismos de la relación planta-microorganismo, en la composición y dinámica social de los microbiomas asociados a las plantas (Bakker *et al.*, 2012), así como en los efectos que tienen los diferentes estresores abióticos en ellos. En fin, es preciso aplicar el concepto del fitobioma en el desarrollo de biofertilizantes en cualquier campo de cultivo y, en particular, aptos para aplicarse en las zonas áridas.

El problema más frecuente de los consorcios microbianos utilizados como biofertilizantes es la resistencia de la microbiota rizosférica nativa a la invasión de los microorganismos del inoculante. Para paliar ese problema se ha propuesto utilizar como trampa a la planta que será biofertilizada para atrapar microorganismos benéficos y, posteriormente, utilizarlos para formular el biofertilizante. Esto haría que los microorganismos del inoculante pudieran integrarse de modo natural a su nicho dentro de la rizosfera (Armada *et al.*, 2018). Como alternativa, se ha sugerido perturbar los microbiomas del suelo (e.g., utilizando fungicidas) para generar un nicho donde puedan introducirse los microorganismos benéficos inoculados (Bakker *et al.*, 2012). Una alternativa menos drástica y más elegante es determinar la arquitectura y dinámica de los microbiomas rizosféricos del cultivo objetivo. Por medio del modelado de los microbiomas rizosféricos, sería posible identificar las especies que mantienen la estructura de la comunidad, las especies que la perturban, y así diseñar la mejor estrategia para introducir en la comunidad a una especie potencialmente benéfica.

TENDENCIAS FUTURAS

El concepto del fitobioma es relativamente nuevo y es necesario divulgarlo entre la comunidad agrícola. Nos encontramos en un momento donde los avances tecnológicos hacen factible lo que hasta hace poco parecía fantasía. La tecnología CRISPR (*clustered regularly interspaced short palindromic repeats*) ha facilitado la generación de nuevas variedades vegetales que, en el contexto del concepto del fitobioma, deberán diseñarse

tomando en cuenta las consecuencias que la mejora o introducción de una propiedad en la planta puede producir en el sistema. Asimismo, las herramientas -ómicas nos permiten conocer la composición, dinámica poblacional y fisiología de las comunidades microbianas. Ahora están disponibles casi de manera exclusiva las del suelo y las rizosféricas, pero pronto se extenderán a las de la filosfera en una multitud de contextos, entre ellos el de las zonas áridas. Esto permitirá determinar los actores principales de la comunidad, su impacto en la productividad de la planta con la que están asociados, así como la influencia que ejercen en ellas el estado del tiempo y las prácticas agrícolas. Aunque el modelado matemático de agrosistemas se encuentra en su infancia, la comunidad científica internacional trabaja de modo activo en el tema, y en el futuro próximo contaremos con modelos del fitobioma robustos que permitirán hacer predicciones confiables de su comportamiento.

CONCLUSIONES

Los problemas generados por la agricultura contemporánea, basada en el desarrollo tecnológico de la revolución verde, así como los retos que plantean el cambio climático y la creciente desertificación, hacen obligado el desarrollo de tecnologías agrícolas que doten de capacidad adaptativa a los cultivos, además de ser amigables con los ambientes. Las estrategias adaptativas de las plantas al estrés hídrico, así como las de los microbios y herbívoros con los que interactúa se entienden cada vez mejor. Sin embargo, la integración de esa información en modelos matemáticos predictivos que guíen la toma de decisiones para una agricultura sostenible en las zonas áridas aún tiene mucho por desarrollar, en particular en la definición de la base teórica a partir de la cual se desarrollen estos modelos. No obstante, un número creciente de herramientas e insumos dirigidos a influir en alguno de los componentes del fitobioma están presentes en el mercado. Son notables la disponibilidad de biofertilizantes y bioestimulantes, los sistemas de biocontrol, así como plataformas en desarrollo para el alertamiento temprano de plagas y enfermedades. Pese a que éstos aún presentan algunas limitaciones, se irán subsanando en la medida que se desarrolle el modelamiento del fitobioma.

REFERENCIAS

- ANDREW, D. R., Fitak, R. R., Munguia-Vega, A., Racolta, A., Martinson, V. G., y Dontsova, K. (2012). "Abiotic factors shape microbial diversity in Sonoran Desert soils", *Applied and Environmental Microbiology*, 78(21), 7527-7537.
- ARIF, I., Batool, M., y Schenk, P. M. (2020). "Plant microbiome engineering: expected benefits for improved crop growth and resilience", *Trends in Biotechnology*, 38(12), 1385-1396.
- ARMADA, E., Leite, M. F. A., Medina, A., Azcón, R., y Kuramae, E. E. (2018). "Native bacteria promote plant growth under drought stress condition without impacting the rhizomicrobiome", *FEMS Microbiology Ecology*, 94(7), fyy092.
- AUGÉ, R. M., Toler, H. D., y Saxton, A. M. (2015). "Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis", *Mycorrhiza*, 25(1), 13-24.
- BÁEZ-PÉREZ, A., Limón-Ortega, A., González-Molina, L., Ramírez-Barrientos, C. E., y Bautista-Cruz, A. (2017). "Efecto de las prácticas de agricultura de conservación en algunas propiedades químicas de los vertisoles", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(4), 759-772.
- BAHRAM, M., Hildebrand, F., Forslund, S. K., Anderson, J. L., Soudzilovskaia, N. A., Bodegom, P. M., Bengtsson-Palme, J., Anslan, S., Coelho, L. P., Harend, H., Huerta-Cepas, J., Medema, M. H., Maltz, M. R., Mundra, S., Olsson, P. A., Pent, M., Pölme, S., Sunagawa, S., Ryberg, M., Tedersoo, L., y Bork, P. (2018). "Structure and function of the global topsoil microbiome", *Nature*, 560(7717), 233-237.
- BAKKER, M. G., Manter, D. K., Shefflin, A. M., Weir, T. L., y Vivanco, J. M. (2012). "Harnessing the rhizosphere microbiome through plant breeding and agricultural management", *Plant and Soil*, 360(1-2), 1-13.
- BAKKER, P. A. H. M., Pieterse, C. M. J., Jonge, R. de, y Berendsen, R. L. (2018). "The soil-borne legacy", *Cell*, 172(6), 1178-1180.

- BAMFORD, P. H., F., C. H., Angel, P., C., G. E., R., W. G., David, B. M., y C., M. M. (2021). “Mexico”, en *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/place/Mexico>.
- BARBER, N. A., y Gorden, N. L. S. (2015). “How do belowground organisms influence plant–pollinator interactions?”, *Journal of Plant Ecology*, 8(1), 1-11.
- BARDGETT, R. D., y Putten, W. H. van der (2014). “Belowground biodiversity and ecosystem functioning”, *Nature*, 515(7528), 505-511.
- BASTIDA, F., López-Mondéjar, R., Baldrian, P., Andrés-Abellán, M., Jehmlich, N., Torres, I. F., García, C., y López-Serrano, F. R. (2019). “When drought meets forest management: effects on the soil microbial community of a Holm oak forest ecosystem”, *Science of the Total Environment*, 662, 276-286.
- BEANS, C. (2017). “Core concept: probing the phytobiome to advance agriculture”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(34), 8900-8902.
- BELL, C. A., Magkourilou, E., Urwin, P. E., y Field, K. J. (2021). “The influence of competing root symbionts on below-ground plant resource allocation”, *Ecology and Evolution*, 11(7), 2997-3003.
- BELL, T. H., Hockett, K. L., Alcalá-Briseño, R. I., Barbercheck, M., Beattie, G., Bruns, M. A., Carlson, J. E., Chung, T., Collins, A., Emmett, B., Esker, P., Garrett, K. A., Glenna, L., Gugino, B. K., Jiménez-Gasco, M. del M., Kinkel, L., Kovac, J., Kowalski, K. P., Kuldau, G., Leveau, J. H. J., Michalska-Smith, M. J., Myrick, J., Peter, K., Vivanco Salazar, M. F., Shade, A., Stopnisek, N., Tan, X., Welty, A., Wickings, K., y Yergeau, E. (2019). “Manipulating wild and tamed phytobiomes: challenges and opportunities”, *Phytobiomes*, 3(1), 3-21.
- BENNETT, J. A., Maherali, H., Reinhart, K. O., Lekberg, Y., Hart, M. M., y Klironomos, J. (2017). “Plant-soil feedbacks and mycorrhizal type influence temperate forest population dynamics”, *Science*, 355(6321), 181-184.
- BERDUGO, M., Delgado-Baquerizo, M., Soliveres, S., Hernández-Clemente, R., Zhao, Y., Gaitán, J. J., Gross, N., Saiz, H., Maire, V., Lehman, A., Rillig, M. C., Solé, R. V., y Maestre, F. T.

- (2020). “Global ecosystem thresholds driven by aridity”, *Science*, 367(6479), 787-790.
- BERNARDO, L., Carletti, P., Badeck, F. W., Rizza, F., Morcia, C., Ghizzoni, R., Roupahel, Y., Colla, G., Terzi, V., y Lucini, L. (2019). “Metabolomic responses triggered by arbuscular mycorrhiza enhance tolerance to water stress in wheat cultivars”, *Plant Physiology and Biochemistry*, 137, 203-212.
- BHATTACHARJEE, A., Velickovic, D., Wietsma, T. W., Bell, S. L., Jansson, J. K., Hofmockel, K. S., y Anderton, C. R. (2020). “Visualizing microbial community dynamics via a controllable soil environment”, *mSystems*, 5(1), e00645-19.
- BOHAN, D. A., Raybould, A., Mulder, C., Woodward, G., Tamaddoni-Nezhad, A., Bluthgen, N., Pocock, M. J. O., Muggleton, S., Evans, D. M., Astegiano, J., Massol, F., Loeuille, N., Petit, S., y Macfadyen, S. (2013). “Chapter one - networking agroecology integrating the diversity of agroecosystem interactions”, *Advances in Ecological Research*, 49, 1-67.
- BORGSTRÖM, P., Strengbom, J., Viketoft, M., y Bommarco, R. (2016). “Aboveground insect herbivory increases plant competitive asymmetry, while belowground herbivory mitigates the effect”, *PeerJ*, 4, e1867.
- CASIANO-DOMÍNGUEZ, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covaleda-Ocon, S., y Aryal, D. R. (2018). “El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México”, *Madera y Bosques*, 24, especial, e2401894.
- CAVICCHIOLI, R., Ripple, W. J., Timmis, K. N., Azam, F., Bakken, L. R., Baylis, M., Behrenfeld, M. J., Boetius, A., Boyd, P. W., Classen, A. T., Crowther, T. W., Danovaro, R., Foreman, C. M., Huisman, J., Hutchins, D. A., Jansson, J. K., Karl, D. M., Koskella, B., Welch, D. B. M., ... Webster, N. S. (2019). “Scientists’ warning to humanity: microorganisms and climate change”, *Nature Reviews Microbiology*, 17(9), 569-586.
- CECCON, E. (2008). “La revolución verde, tragedia en dos actos”, *Ciencia*, 91, 21-29.

- CERVANTES, R. A., Angulo, G. V., Tavizón, E. F., y González, J. R. (2014). "Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz", *Investigación y Ciencia*, 22(61), 48-53.
- CHEN, H., Zhao, X., Lin, Q., Li, G., y Kong, W. (2019). "Using a combination of PLFA and DNA-based sequencing analyses to detect shifts in the soil microbial community composition after a simulated spring precipitation in a semi-arid grassland in China", *Science of the Total Environment*, 657, 1237-1245.
- CHENG, H.-Q., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., y Kuča, K. (2021). "Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate drought stress in trifoliolate orange by regulating H⁺-ATPase activity and gene expression", *Frontiers in Plant Science*, 12, 659694.
- CONDE, C., Ferrer, R., y Orozco, S. (2006). "Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study", *Atmósfera*, 19(3), 181-194.
- DÁTILLO, W., Aguirre, A., Flores-Flores, R. V., Fagundes, R., Lange, D., García-Chávez, J., Del-Claro, K., y Rico-Gray, V. (2015). "Secretory activity of extrafloral nectaries shaping multitrophic ant-plant-herbivore interactions in an arid environment", *Journal of Arid Environments*, 114, 104-109.
- DÍAZ-CASTELAZO, C., Guimarães, P. R., Jordano, P., Thompson, J. N., Marquis, R. J., y Rico-Gray, V. (2010). "Changes of a mutualistic network over time: reanalysis over a 10-year period", *Ecology*, 91(3), 793-801.
- DÍAZ-PADILLA, G., Sánchez-Cohen, I., Guajardo-Panes, R. A., Ángel-Pérez, A. L. D., Ruiz-Corral, A., Medina-García, G., e Ibarra-Castillo, D. (2011). "Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México", *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17, especial, 267-275.
- DONATELLI, M., Magarey, R. D., Bregaglio, S., Willocquet, L., Whish, J. P. M., y Savary, S. (2017). "Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems", *Agricultural Systems*, 155, 213-224.
- FÁBREGAS, R., Kremer, M., y Schilbach, F. (2019). "Realizing the potential of digital development: the case of agricultural advice", *Science*, 366(6471), eaay3038.

- FAO (2021). “Adaptación y mitigación al cambio climático”. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/climate-change-adaptation-and-mitigation/basic-knowledge/es/#:~:text=La%20adaptaci%C3%B3n%20y%20la%20mitigaci%C3%B3n,la%20adaptaci%C3%B3n%20aborda%20sus%20impactos>.
- FIORILLI, V., Vannini, C., Ortolani, F., Garcia-Seco, D., Chiapello, M., Novero, M., Domingo, G., Terzi, V., Morcia, C., Bagnaresi, P., Moulin, L., Bracale, M., y Bonfante, P. (2018). “Omics approaches revealed how arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances yield and resistance to leaf pathogen in wheat”, *Scientific Reports*, 8(1), 9625.
- FUCHSLUEGER, L., Bahn, M., Fritz, K., Hasibeder, R., y Richter, A. (2014). “Experimental drought reduces the transfer of recently fixed plant carbon to soil microbes and alters the bacterial community composition in a mountain meadow”, *New Phytologist*, 201(3), 916-927.
- GÁMEZ, A. E., Wurl, J., y Graciano, J. C. (2014). “Disponibilidad y uso del agua en el oasis de los Comondú, Baja California Sur: retos y oportunidades para el desarrollo rural”, *Región y Sociedad*, 26(60), 165-190.
- GAY, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., y Villers, L. (2006). “Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico”, *Climatic Change*, 79, 259-288.
- GENRE, A., Lanfranco, L., Perotto, S., y Bonfante, P. (2020). “Unique and common traits in mycorrhizal symbioses”, *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), 649-660.
- GEWIN, V. (2010). “Food: an underground revolution”, *Nature*, 466(7306), 552-553.
- GILLESPIE, M. A. K., Jacometti, M., Tylianakis, J. M., y Wratten, S. D. (2018). “Community dynamics can modify the direction of simulated warming effects on crop yield”, *PLoS One*, 13(11), e0207796.
- GONZÁLEZ-MEDRANO, F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*. México: Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- GONZÁLEZ-ROMERO, S. L., Franco-Mora, O., Ramírez-Ayala, C., Ortega-Escobar, H. M., Quero-Carrillo, A. R., y Trejo-López, C. (2011). “Germinación y crecimiento de alfalfa bajo condiciones salinas”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 169-174.
- GOPAL, M., Gupta, A., y Thomas, G. V. (2013). “Bespoke microbiome therapy to manage plant diseases”, *Frontiers in Microbiology*, 4, 355.
- GORNALL, J., Betts, R., Burke, E., Clark, R., Camp, J., Willett, K., y Wiltshire, A. (2010). “Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2973-2989.
- GRANADOS-SÁNCHEZ, D., Hernández-García, M. A., Vázquez-Alarcón, A., y Ruiz-Puga, P. (2013). “Los procesos de desertificación y las regiones áridas”, *Revista Chapingo*, 19(1), 45-66.
- HAMMERL, V., Kastl, E.-M., Schloter, M., Kublik, S., Schmidt, H., Weigl, G., Jentsch, A., Beierkuhnlein, C., y Gschwendtner, S. (2019). “Influence of rewetting on microbial communities involved in nitrification and denitrification in a grassland soil after a prolonged drought period”, *Scientific Reports*, 9(1), 2280.
- HAN, Z., Tan, X., Wang, Y., Xu, Q., Zhang, Y., Harwood, J. D., y Chen, J. (2019). “Effects of simulated climate warming on the population dynamics of *Sitobion avenae* (Fabricius) and its parasitoids in wheat fields”, *Pest Management Science*, 75(12), 3252-3259.
- HASHEM, A., Abd_Allah, E. F., Alqarawi, A. A., Al-Huqail, A. A., Wirth, S., y Egamberdieva, D. (2016). “The interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic bacteria enhances plant growth of *Acacia gerrardii* under salt stress”, *Frontiers in Microbiology*, 7, 1089.
- HEO, C. C., Teel, P. D., Banfield, M. M., y Tomberlin, J. K. (2019). “Soil arthropod community responses to carrion with delayed insect access”, *Food Webs*, 20, e00118.
- HUANG, D., Ma, M., Wang, Q., Zhang, M., Jing, G., Li, C., y Ma, F. (2020). “Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced drought resistance in apple by regulating genes in the MAPK pathway”, *Plant Physiology and Biochemistry*, 149, 245-255.

- HUANG, Y.-M., Zou, Y.-N., y Wu, Q.-S. (2017). "Alleviation of drought stress by mycorrhizas is related to increased root H₂O₂ efflux in trifoliolate orange", *Scientific Reports*, 7(1), 42335.
- INEGI (2021). "Encuesta nacional agropecuaria 2019". México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2019/#Tabulados>.
- JOHANSSON, F., Orizaola, G., y Nilsson-Örtman, V. (2020). "Temperate insects with narrow seasonal activity periods can be as vulnerable to climate change as tropical insect species", *Scientific Reports*, 10(1), 8822.
- JOHNSON, S. N., Lopaticki, G., Barnett, K., Facey, S. L., Powell, J. R., y Hartley, S. E. (2016). "An insect ecosystem engineer alleviates drought stress in plants without increasing plant susceptibility to an above-ground herbivore", *Functional Ecology*, 30(6), 894-902.
- JOHNSTON, E. R., Hatt, J. K., He, Z., Wu, L., Guo, X., Luo, Y., Schuur, E. A. G., Tiedje, J. M., Zhou, J., y Konstantinidis, K. T. (2019). "Responses of tundra soil microbial communities to half a decade of experimental warming at two critical depths", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(30), 15096-15105.
- JURBURG, S. D., Natal-da-Luz, T., Raimundo, J., Morais, P. V., Sousa, J. P., Elsas, J. D. van, y Salles, J. F. (2018). "Bacterial communities in soil become sensitive to drought under intensive grazing", *Science of the Total Environment*, 618, 1638-1646.
- KAGATA, H., y Ohgushi, T. (2012). "Positive and negative impacts of insect frass quality on soil nitrogen availability and plant growth", *Population Ecology*, 54(1), 75-82.
- KE, J., Wang, B., y Yoshikuni, Y. (2020). "Microbiome engineering: synthetic biology of plant-associated microbiomes in sustainable agriculture", *Trends in Biotechnology*, 30(3), 244-261.
- KOUTROULIS, A. G. (2019). "Dryland changes under different levels of global warming", *Science of the Total Environment*, 655, 482-511.
- LAKSHMANAN, V., Ray, P., y Craven, K. D. (2017). "Toward a resilient, functional microbiome: Drought tolerance-alleviating microbes for sustainable agriculture", en R. Sunkar (ed.), *Plant stress tolerance. Methods and protocols*. Stillwater, OK: Humana Press, 69-84.

- LEYVA-MORALES, J. B., Valdez-Torres, J. B., Bastidas-Bastidas, P. de J., Angulo-Escalante, M. Á., Sánchez, J. I. S., Barraza-Lobo, A. L., Rubio, C. O., y Chaidez-Quiroz, C. (2017). "Monitoring of pesticides residues in northwestern Mexico rivers", *Acta Universitaria*, 27(1), 45-54.
- LIBERT-AMICO, A., y Paz-Pellat, F. (2018). "Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas", *Madera y Bosques*, 24, e2401914.
- LIU, F., Hewezi, T., Lebeis, S. L., Pantalone, V., Grewal, P. S., y Staton, M. E. (2019). "Soil indigenous microbiome and plant genotypes cooperatively modify soybean rhizosphere microbiome assembly", *BMC Microbiology*, 19(1), 201.
- LÓPEZ-SANTOS, A. (2016). "Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México?" *Terra Latinoamericana*, 34, 239-249.
- LOUARN, G., y Song, Y. (2020). "Two decades of functional-structural plant modelling: now addressing fundamental questions in systems biology and predictive ecology", *Annals of Botany*, 126(4), 501-509.
- MAO, Y., Li, X., Smyth, E. M., Yannarell, A. C., y Mackie, R. I. (2014). "Enrichment of specific bacterial and eukaryotic microbes in the rhizosphere of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) through root exudates", *Environmental Microbiology Reports*, 6(3), 293-306.
- MATHUR, S., Tomar, R. S., y Jajoo, A. (2019). "Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) protects photosynthetic apparatus of wheat under drought stress", *Photosynthesis Research*, 139(1-3), 227-238.
- MÉNDEZ ROJAS, D. A. (2017). "Notas para una historia transnacional de la revolución verde", *Cuadernos Americanos*, 162, 137-164.
- MENÉNDEZ, R. (2007). "How are insects responding to global warming?" *Tijdschrift Voor Entomologie*, 150(2), 355.
- MENZEL, F., y Feldmeyer, B. (2021). "How does climate change affect social insects?", *Current Opinion in Insect Science*, 46, 10-15.
- Met Office (2011). "Climate: observations, projections and impacts, Mexico". <http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/c/6/Mexico.pdf>.
- MIDDLETON, N. J., y Sternberg, T. (2013). "Climate hazards in drylands: a review", *Earth-Science Reviews*, 126, 48-57.

- MORENO, C. E., Sánchez-Rojas, G., Pineda, E., y Escobar, F. (2007). "Shortcuts for biodiversity evaluation: a review of terminology and recommendations for the use of target groups, bioindicators and surrogates", *International Journal of Environment and Health*, 1(1), 71-86.
- MORENO, J. L., Torres, I. F., García, C., López-Mondéjar, R., y Bastida, F. (2019). "Land use shapes the resistance of the soil microbial community and the C cycling response to drought in a semi-arid area", *Science of the Total Environment*, 648, 1018-1030.
- MORRISSEY, J. P., Dow, J. M., Mark, G. L., y O'Gara, F. (2004). "Are microbes at the root of a solution to world food production? Rational exploitation of interactions between microbes and plants can help to transform agriculture", *EMBO Reports*, 5(10), 922-926.
- NICHOLS, E., Spector, S., Louzada, J., Larsen, T., Amezquita, S., Favila, M. E., y Network, T. S. R. (2008). "Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles", *Biological Conservation*, 141(6), 1461-1474.
- NOYOLA-MEDRANO, M. C., Ramos-Leal, J. A., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez, L. F., López-Loera, H., y Carbajal, N. (2009). "Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2), 395-410.
- NUCCIO, E. E., Hodge, A., Pett-Ridge, J., Herman, D. J., Weber, P. K., y Firestone, M. K. (2013). "An arbuscular mycorrhizal fungus significantly modifies the soil bacterial community and nitrogen cycling during litter decomposition", *Environmental Microbiology*, 15(6), 1870-1881.
- OCHOA-HUESO, R., Collins, S. L., Delgado-Baquerizo, M., Hamonts, K., Pockman, W. T., Sinsabaugh, R. L., Smith, M. D., Knapp, A. K., y Power, S. A. (2018). "Drought consistently alters the composition of soil fungal and bacterial communities in grasslands from two continents", *Global Change Biology*, 24(7), 2818-2827.

- OJEDA-BUSTAMANTE, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., y Montero-Martínez, M. J. (2011). "Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos", *Agrociencia*, 45(1), 1-11.
- OJEDA-SILVERA, C. M., Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Troyo-Diéguez, E., Reynaldo-Escobar, I. M., Ruiz-Espinoza, F. H., y García-Hernández, J. L. (2015). "Emergencia y crecimiento de plántulas de variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) sometidas a estrés hídrico", *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(5), 151-161.
- ORTIZ, N., Armada, E., Duque, E., Roldán, A., y Azcón, R. (2015). "Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi and/or bacteria to enhancing plant drought tolerance under natural soil conditions: effectiveness of autochthonous or allochthonous strains", *Journal of Plant Physiology*, 174, 87-96.
- OU, Y., Penton, C. R., Geisen, S., Shen, Z., Sun, Y., Lv, N., Wang, B., Ruan, Y., Xiong, W., Li, R., y Shen, Q. (2019). "Deciphering underlying drivers of disease suppressiveness against pathogenic *Fusarium oxysporum*", *Frontiers in Microbiology*, 10, 2535.
- PARDO-LÓPEZ, L., Soberón, M., y Bravo, A. (2013). "*Bacillus thuringiensis* insecticidal three-domain Cry toxins: mode of action, insect resistance and consequences for crop protection", *FEMS Microbiology Reviews*, 37(1), 3-22.
- PAVÉ, A. (2006). "By way of introduction: modelling living systems, their diversity and their complexity: some methodological and theoretical problems", *Comptes Rendus Biologies*, 329(1), 3-12.
- PEDROZA-SANDOVAL, A., Trejo-Calzada, R., Sánchez-Cohen, I., Samaniego-Gaxiola, J. A., y Yáñez-Chávez, L. G. (2015). "Evaluation of three pinto bean varieties under drought and irrigation in Durango, Mexico", *Mesoamerican Agronomy*, 27(1), 167-176.
- PHILLIPS, R. L. (2014). "Green revolution: past, present and future", en *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444525123002084?via%3Dihub>.
- PINGALI, P. L. (2012). "Green revolution: impacts, limits, and the path ahead", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(31), 12302-12308.

- PINSTRUP-ANDERSEN, P., y Hazell, P. (1985). “The impact of the green revolution and prospects for the future”, *Food Reviews International*, 1, 1-25.
- PONS, C., Voß, A., Schweiger, R., y Müller, C. (2020). “Effects of drought and mycorrhiza on wheat and aphid infestation”, *Ecology and Evolution*, 10(19), 10481-10491.
- QUALSET, C. O., y Shands, H. L. (2005). *Safeguarding the future of U.S. agriculture: the need to conserve threatened collections of crop diversity worldwide*. University of California. Division of Agriculture and Natural Resources, Genetic Resources Conservation Program.
- RAVEN, P. H., y Wagner, D. L. (2021). “Agricultural intensification and climate change are rapidly decreasing insect biodiversity”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(2), e2002548117.
- REIS, F., Magalhães, A. P., Tavares, R. M., Baptista, P., y Lino-Neto, T. (2021). “Bacteria could help ectomycorrhizae establishment under climate variations”, *Mycorrhiza*, 31(3), 395-401.
- RESÉNDIZ-FLORES, N. S., Núñez, R. M. G., Hernández-Martínez, M. Á., Uribe-Gómez, M., y Leos-Rodríguez, J. A. (2016). “Goma de mezquite y huizache como alternativa de aprovechamiento en sistemas agroforestales”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16 (especial), 3251-3261.
- RICH, M. K., Vigneron, N., Libourel, C., Keller, J., Xue, L., Hajheidari, M., Radhakrishnan, G. V., Ru, A. L., Diop, S. I., Potente, G., Conti, E., Duijsings, D., Batut, A., Faouder, P. L., Kodama, K., Kyojuka, J., Sallet, E., Bécard, G., Rodriguez-Franco, M., ... Delaux, P.-M. (2021). “Lipid exchanges drove the evolution of mutualism during plant terrestrialization”, *Science*, 372(6544), 864-868.
- RICO-GRAY, V., Díaz-Castelazo, C., Ramírez-Hernández, A., Guimarães, P. R., y Holland, J. N. (2012). “Abiotic factors shape temporal variation in the structure of an ant–plant network”, *Arthropod-Plant Interactions*, 6(2), 289-295.
- RIVERA, J. L. M. (2016). “Hacer florecer al desierto: análisis sobre la intensidad de uso de los recursos hídricos subterráneos y superficiales en Chihuahua, México”, *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 13(77), 35-61.

- ROCCA, J. D., Simonin, M., Blaszcak, J. R., Ernakovich, J. G., Gibbons, S. M., Midani, F. S., y Washburne, A. D. (2018). “The microbiome stress project: toward a global meta-analysis of environmental stressors and their effects on microbial communities”, *Frontiers in Microbiology*, 9, 3272.
- ROMERO, A. A., Rivas, A. I. M., Díaz, J. D. G., Mendoza, M. Á. P., Salas, E. N. N., Blanco, J. L., y Álvarez, A. C. C. (2020). “Crop yield simulations in Mexican agriculture for climate change adaptation”, *Atmósfera*, 33(3), 215-231.
- RUIZ-LOZANO, J. M., Aroca, R., Zamarreño, Á. M., Molina, S., Andreo-Jiménez, B., Porcel, R., García-Mina, J. M., Ruyter-Spira, C., y López-Ráez, J. A. (2016). “Arbuscular mycorrhizal symbiosis induces strigolactone biosynthesis under drought and improves drought tolerance in lettuce and tomato”, *Plant, Cell & Environment*, 39(2), 441-452.
- RYALLS, J. M. W., Moore, B. D., Riegler, M., y Johnson, S. N. (2016). “Above-belowground herbivore interactions in mixed plant communities are influenced by altered precipitation patterns”, *Frontiers in Plant Science*, 7, 345.
- SÁNCHEZ-BAYO, F., y Wyckhuys, K. A. G. (2019). “Worldwide decline of the entomofauna: a review of its drivers”, *Biological Conservation*, 232, 8-27.
- SÁNCHEZ-ROMERA, B., Ruiz-Lozano, J. M., Zamarreño, Á. M., García-Mina, J. M., y Aroca, R. (2016). “Arbuscular mycorrhizal symbiosis and methyl jasmonate avoid the inhibition of root hydraulic conductivity caused by drought”, *Mycorrhiza*, 26(2), 111-122.
- SCHEUBLIN, T. R., Sanders, I. R., Keel, C., y Meer, J. R. van der (2010). “Characterisation of microbial communities colonising the hyphal surfaces of arbuscular mycorrhizal fungi”, *ISME Journal*, 4(6), 752-763.
- SEDEEK, K. E. M., Mahas, A., y Mahfouz, M. (2019). “Plant genome engineering for targeted improvement of crop traits”, *Frontiers in Plant Science*, 10, 114, 10:114.
- SEMARNAT (2021). “El medio ambiente en México. Suelos”. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://>

apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/03_suelos/3_3.html.

- SHEIK, C. S., Beasley, W. H., Elshahed, M. S., Zhou, X., Luo, Y., y Krumholz, L. R. (2011). "Effect of warming and drought on grassland microbial communities", *ISME Journal*, 5(10), 1692-1700.
- SIAP (2021). "Infografías agroalimentarias 2020". México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2020/Infografias-2020.
- SON, J. W., Shoaie, S., y Lee, S. (2020). "Systems biology: a multi-omics integration approach to metabolism and the microbiome", *Endocrinology and Metabolism*, 35(3), 507-514.
- SONNENFELD, D. A. (1992). "Mexico's 'green revolution', 1940-1980: towards an environmental history", *Environmental History Review*, 16(4), 28-52.
- SOTO-PINTO, L., y Jiménez-Ferrer, G. (2018). "Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales", *Madera y Bosques*, 24, e2401887.
- STRICKLAND, M. S., McCulley, R. L., Nelson, J. A., y Bradford, M. A. (2015). "Compositional differences in simulated root exudates elicit a limited functional and compositional response in soil microbial communities", *Frontiers in Microbiology*, 6, 817.
- TAVASSOLY, I., Goldfarb, J., y Iyengar, R. (2018). "Systems biology primer: the basic methods and approaches", *Essays in Biochemistry*, 62(4), 487-500.
- TCHAKERIAN, V. P. (2015). "Hydrology, floods and droughts. Deserts and desertification", en *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, segunda edición. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123822253000359>.
- TEDERSOO, L., Bahram, M., y Zobel, M. (2020). "How mycorrhizal associations drive plant population and community biology", *Science*, 367(6480), eaba1223.
- VILLERS-RUIZ, L., y Trejo-Vázquez, I. (1998). "Climate change on Mexican forests and natural protected areas", *Global Environmental Change*, 8(2), 141-157.

- VRIES, F. T. de, Griffiths, R. I., Knight, C. G., Nicolitch, O., y Williams, A. (2020). “Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production”, *Science*, 368(6488), 270-274.
- WARDLE, D. A. (2006). “The influence of biotic interactions on soil biodiversity”, *Ecology Letters*, 9(7), 870-886.
- WESTERHOFF, H. V., y Hofmeyr, J.-H. S. (2005). “What is systems biology? From genes to function and back”, en L. Albergina y H. V. Westerhoff (eds.), *Systems biology, definitions and perspectives*. Alemania: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 119-141.
- WU, H.-H., Zou, Y.-N., Rahman, M. M., Ni, Q.-D., y Wu, Q.-S. (2017). “Mycorrhizas alter sucrose and proline metabolism in trifoliolate orange exposed to drought stress. *Scientific Reports*”, 7(1), 42389.
- WU, Q.-S., He, J.-D., Srivastava, A. K., Zou, Y.-N., y Kuča, K. (2019). “Mycorrhizas enhance drought tolerance of citrus by altering root fatty acid compositions and their saturation levels”, *Tree Physiology*, 39(7), 1149-1158.
- ZELLWEGER, F., Frenne, P. D., Lenoir, J., Vangansbeke, P., Verheyen, K., Bernhardt-Römermann, M., Baeten, L., Hédli, R., Berki, I., Brunet, J., Calster, H. V., Chudomelová, M., Decocq, G., Dirnböck, T., Durak, T., Heinken, T., Jaroszewicz, B., Kopecký, M., Máliš, F., ... Coomes, D. (2020). “Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming”, *Science*, 368(6492), 772-775.
- ZHALNINA, K., Louie, K. B., Hao, Z., Mansoori, N., Rocha, U. N. da, Shi, S., Cho, H., Karaoz, U., Loqué, D., Bowen, B. P., Firestone, M. K., Northen, T. R., y Brodie, E. L. (2018). “Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive patterns in rhizosphere microbial community assembly”, *Nature Microbiology*, 3(4), 470-480.
- ZOU, Y.-N., Wu, Q.-S., y Kuča, K. (2020). “Unravelling the role of arbuscular mycorrhizal fungi in mitigating the oxidative burst of plants under drought stress”, *Plant Biology*, 23(S1), 50-57.
- ZOU, Y.-N., Huang, Y.-M., Wu, Q.-S., y He, X.-H. (2015). “Mycorrhiza-induced lower oxidative burst is related with higher antioxidant enzyme activities, net H₂O₂ effluxes, and Ca²⁺ influxes in trifoliolate orange roots under drought stress”, *Mycorrhiza*, 25(2), 143-152.

CAPÍTULO 3
LEGUMINOSAS DE LOS DESIERTOS
CHIHUAHUENSE Y SONORENSE
DIVERSIDAD, APORTES A LA DIETA, A LA MEDICINA
TRADICIONAL Y POTENCIAL TECNOLÓGICO

GABRIELA RAMOS CLAMONT MONTFORT¹

MARÍA CRISTINA CUETO WONG

GABRIELA VARGAS GONZÁLEZ²

RESUMEN

En los desiertos chihuahuense y sonoreense existen alrededor de 245 géneros de leguminosas representados por matorrales y árboles-arbustos que han desempeñado un papel preponderante para la permanencia de la vida en estas regiones extremas. Las leguminosas arbóreas sirven como planta nodriza y mejoran la fertilidad del suelo, además que protegen a otras plantas y animales. Las civilizaciones que habitaron estos desiertos obtuvieron de ellas alimento, medicina, forraje, herramientas, combustible y abrigo. Estos usos etnobotánicos han trascendido en estudios sobre las proteínas, carbohidratos complejos y metabolitos secundarios de las leguminosas nativas, que buscan posibles aplicaciones nutricionales, funcionales y farmacéuticas, como complemento al principal uso actual, que es la producción de carbón vegetal. Tanto para controlar la tala inmoderada de algunas leguminosas nativas como para lograr su aprovechamiento integral, se requieren políticas públicas y acciones

¹ Coordinación de Ciencia de los Alimentos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas, núm. 46, La Victoria, Hermosillo, Sonora, México. CP 83304. Autora de correspondencia: gramos@ciad.mx.

² Laboratorio de Ciencia y Tecnología de los Alimentos Orientados a la Salud, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Coahuila.

conjuntas que permitan el uso sustentable y sostenible de estas plantas, al tiempo que conserven la biodiversidad.

PALABRAS CLAVE: etnobotánica, gomas, leguminosas del desierto, metabolitos secundarios, proteínas, reforestación.

INTRODUCCIÓN

En los desiertos chihuahuense y sonoreense han habitado al menos veinte civilizaciones antiguas que aprendieron a utilizar las plantas de la región como alimento, medicina, vestimenta, refugio, forraje y combustible (Alsharif *et al.*, 2020). Entre estas plantas se encuentran las leguminosas, que destacan por su utilización, además de los árboles-arbustos de los géneros *Acacia*, *Olneya*, *Parkinsonia* y *Prosopis*. Las semillas de estas plantas son ricas en proteínas con potencial para consumo humano (Cattaneo *et al.*, 2016). Además, son fuente de carbohidratos complejos y de metabolitos secundarios con potencial tecnológico para utilizarse como ingredientes funcionales, bioinsecticidas y medicamentos (Ku *et al.*, 2020). En este capítulo analizaremos la importancia y potencialidad de las leguminosas de los desiertos chihuahuense y sonoreense, sus usos pasados y potencialidad futura, además de resaltar la necesidad de preservarlas, protegerlas y reforestarlas para que su aprovechamiento sea sustentable.

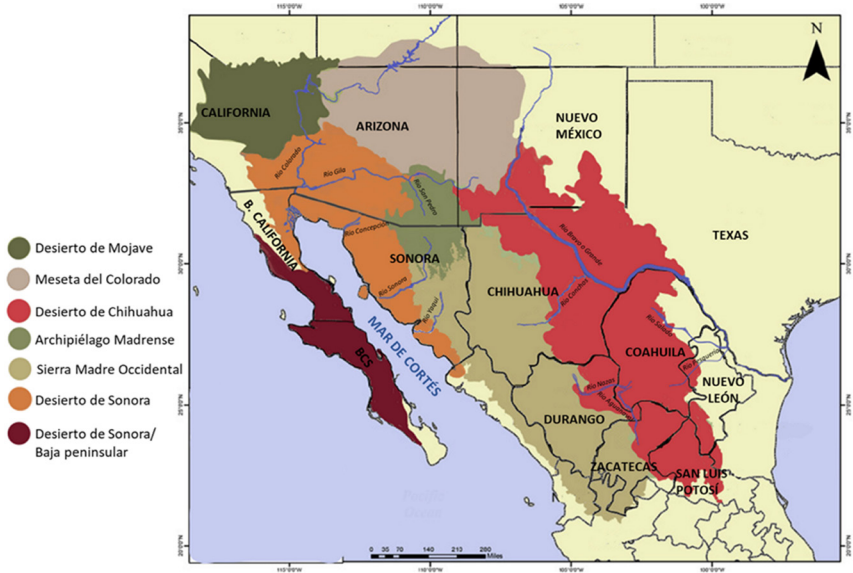
LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE Y SONORENSE Y SU DIVERSIDAD EN ESPECIES DE LEGUMINOSAS

Los desiertos mexicanos ocupan el 60% del territorio nacional, siendo los desiertos chihuahuense y sonoreense las dos ecorregiones desérticas más distintivas por su diversidad biológica. Ambos se extienden al sur de Estados Unidos y constituyen dos regiones binacionales de gran importancia biológica, antropológica y cultural (Bradley y Colodner, 2020).

El Desierto Chihuahuense es el más grande de Norteamérica, con altitudes entre 900 y 1 500 m (Briggs *et al.*, 2020; Dinerstein *et al.*, 2001). Abarca una parte importante de los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí, y una pequeña porción de los estados de Nuevo León e Hidalgo (Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020). En Estados Unidos, se extiende en gran parte de Nuevo México, de la región Trans-Pecos de Texas y en una pequeña región del estado de Arizona (figura 1). A la fecha no existe consenso sobre la extensión total de este desierto, estimándose entre los 350 000 y los 629 000 km². Ello, debido a los diferentes criterios considerados en el establecimiento de los

límites de la región (Schmidt, 1979; Zavala-Hurtado y Jiménez, 2020). Para estudios de biodiversidad, Zavala-Hurtado y Jiménez (2020) proponen considerar una extensión de 507 000 km².

FIGURA 1



Localización de los desiertos chihuahuense y sonorense.

Fuente: Modificado de Bradley y Colodner (2020), y Briggs *et al.* (2019).

El Desierto Sonorense abarca más de 224 000 km². En México incluye al estado de Sonora, la península de Baja California, el golfo de California y sus islas. En Estados Unidos, se extiende desde el sur de Arizona, al norte de Mogollon Rim y la parte sureste de California (desde Needles hasta Palm Springs y San Diego) (Bradley y Colodner, 2020). Algunos científicos han utilizado estudios genómicos para conocer la distribución geográfica contemporánea de las especies en este desierto (Riddle *et al.*, 2000). Descubrieron que la península de Baja California tiene una biota evolutiva única y propusieron considerarla como un desierto separado (el Desierto Peninsular). Aunque la propuesta no ha tenido aceptación (Hafner y Riddle, 2011), se hace la diferencia en la figura 1 para propósitos ilustrativos.

Hábitats y biodiversidad vegetal

Una gran parte del Desierto Chihuahuense está compuesta por rocas sedimentarias de origen marino y montañas de origen ígneo (Ferrusquía-Villafranca *et al.*, 2005). El clima es relativamente uniforme con veranos calurosos e inviernos fríos (Schmidt, 1979). Las principales fuentes de humedad son el mar de Cortés y el golfo de México; las precipitaciones (150 a 500 mm durante el verano) provienen de las lluvias monzónicas (Briggs *et al.*, 2020). Las áreas ribereñas del Desierto Chihuahuense son esenciales para la vida en general y para el desarrollo de culturas, como las de los pimas, guarijíos, rarámuris, tepehuanos (del norte y del sur; ódami y o'dam), irritilas, kikapues, huastecos y pames. Entre los sistemas hídricos más importantes de este desierto se encuentran los ríos Bravo (Grande), Pecos, Gila, Conchos, Casas Grandes, Salado, Pesqueira, Nazas y Aguanaval (Lacroix *et al.*, 2017).

En el Desierto Chihuahuense habitan alrededor de 3 500 especies de plantas, las cuales dominan los matorrales desérticos rosetófilos y micrófilos (Zavala-Hurtado *et al.*, 2020). Además, habitan alrededor de 324 especies de cactáceas distribuidas en 39 géneros (Granados-Sánchez *et al.*, 2011). La gobernadora (*Larrea tridentata*), la lechuguilla (*Agave lechuguilla*) y la hoja de hacha (*Flourensia cernua*) dominan en los lugares más secos; en las tierras bajas habitan el sotol (*Dasyilirion wheeleri*) y la yuca (*Yucca treculeana*). En los pastizales, leguminosas de los géneros *Acacia* y *Prosopis* (Zavala-Hurtado *et al.*, 2020). El endemismo es importante, debido al aislamiento impuesto por la Sierra Madre Oriental y la Occidental. Villarreal-Quintanilla *et al.* (2017) encontraron 671 especies de plantas endémicas. Este desierto enfrenta grandes amenazas como la pérdida y fragmentación de hábitats, deterioro de cuerpos de agua dulce, incendios forestales y cambio climático, que pueden acabar en poco tiempo con su biodiversidad (Briggs *et al.*, 2020).

El Desierto Sonorense también se caracteriza por su gran biodiversidad vegetal. Los cuerpos de agua permitieron el desarrollo de culturas como los pimas, cahuillas, guarijíos, seris, yaquis, mayos, pápagos, cupapás, kumiais, kiliuas, paipáis, cochimíes y ku'ahles, y diversos grupos de inmigrantes que poblaron estas regiones posteriormente (Mays, 2007). Entre los principales ríos de la región, se encuentran el Sonora,

de la Concepción, Sonoyta, Colorado, Gila, San Pedro-Wilcox y Yaqui (Lacroix *et al.*, 2017).

El Desierto Sonorense se distingue por la presencia de cactus columnares como cardones (*Pachycereus pringlei*) y saguaros (*Carnegiea gigantea*), y por la abundancia de árboles-arbustos de leguminosas de los géneros *Acacia*, *Caesalpinia* y *Prosopis* (Dimmitt, 2015). En el valle inferior del río Colorado predominan arbustos como *Ambrosia dumosa* y *Larrea tridentata*. Los cactus y los árboles de leguminosas sólo se encuentran en lavados y arroyos (Bilderback *et al.*, 2021).

En las tierras altas de Arizona predominan bosques de saguaros y palo verdes; se encuentran también *Agave angustifolia* (bacanora), *Fouquieria splendens* (ocotillo) y *Simmondsia chinensis* (jojoba) (Bradley y Colodner, 2020). La llanura de Sonora (parte de central de Sonora) tiene una vegetación similar a la de las tierras altas de Arizona, pero con poblaciones más densas de árboles de leguminosas. Entre estos se encuentran *Parkinsonia aculeata* (palo verde), *Prosopis velutina* (mezquite), *Cercidium praecox* (palo de brea), *Acacia constricta* (vinorama), *Acacia cymbispina* (chirahui), *Acacia occidentalis* (tésota), *Acacia mcmurphy* (tepeguaje), *Desmanthus palmeri* (mezquitillo), *Caesalpinia caladenia* (palo dorado) y *Caesalpinia pumila* (palo piojo) (Ortega-Nieblas, 1993). La costa central del golfo de California está dominada por grandes suculentas y árboles-arbusto de leguminosas. El Desierto Sonorense también presenta una gran cantidad de especies endémicas; destacan, entre las plantas, el palo fierro (*Olneya tesota*), el cirio (*Fouquieria columnaris*) y el guayacán (*Guaiacum coulteri*) (Dimmitt, 2015).

Leguminosas de los desiertos chihuahuense y sonorense

Las leguminosas (Leguminosae o Fabaceae) son la tercera familia de plantas más abundante del mundo. Engloban especies perenes y anuales, árboles y arbustos. Su principal característica es su fruto seco dehiscente, dispuesto en vainas o legumbres (Azani *et al.*, 2017). Estas plantas han sido de gran importancia para el desarrollo de la civilización humana, que las ha utilizado como alimento, medicina, forraje, madera de construcción, etc. (Moreno-Salazar *et al.*, 2008).

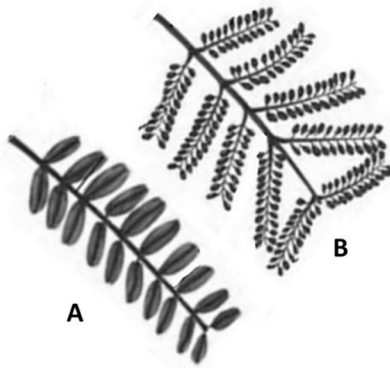
Las leguminosas se destacan por la interacción simbiótica que establecen con bacterias conocidas como rizobios. Éstas inducen la formación de nódulos en la raíz de la planta y fijan N_2 atmosférico, reduciéndolo a nitrógeno orgánico (Zakhia *et al.*, 2006). Los rizobios son filogenéticamente diversos, compuestos por doce géneros y aproximadamente noventa especies de protobacterias α y β (Tian *et al.*, 2012). Entre las α protobacterias se encuentran los géneros *Allorhizobium*, *Azorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Rhizobium* y *Sinorhizobium* (Tian *et al.*, 2012). También se reconocen como rizobios a α protobacterias de los géneros *Blastobacter*, *Devosia*, *Methylobacterium* y *Ochrobactrum*, mientras que en las β protobacterias se encuentran los géneros *Burkholderia* y *Ralstonia*, entre otros (Zakhia *et al.*, 2006).

La taxonomía actual divide a las leguminosas en seis subfamilias: Caesalpinioideae (148 géneros); Cercidoideae (12 géneros); Detarioideae (84 géneros); Dialioideae (17 géneros); Duparquetioideae (1 género) y Faboideae/Papilionoideae (503 géneros) (Azani *et al.*, 2017). En Norteamérica se cuentan 245 géneros con más de 2 694 taxones. Los cinco géneros más grandes de esta familia incluyen *Acacia* (1 380 especies), *Astragalus* (2 481 especies), *Crotalaria* (698 especies) *Indigofera* (665 especies) y *Mimosa* (618 especies) (Azani *et al.*, 2017; Yahara *et al.*, 2013).

En los desiertos chihuahuense y sonoreense existe una gran diversidad de leguminosas, entre las que destacan los árboles-arbustos (Dimmitt, 2015). Gei *et al.* (2018) atribuyen la capacidad de supervivencia de las leguminosas del desierto a características fenotípicas como la de tener hojas pequeñas, insertadas a los lados del peciolo y en ángulo recto respecto al eje central (pinnadas o bipinnadas; figura 2). Este tamaño y disposición permiten la regulación de la temperatura foliar y evitan una evaporación excesiva (Gei *et al.*, 2018).

La simbiosis con los rizobios satisface la demanda de nitrógeno durante periodos de sequía y mejora la capacidad fotosintética de la planta. Algunos de estos microorganismos también inhiben el crecimiento de patógenos de plantas, que se transmiten a través del suelo (Gautam *et al.*, 2015). Con base en estudios morfofisiológicos y moleculares, los rizobios aislados de las leguminosas de regiones áridas son cepas tolerantes al calor que pertenecen principalmente a los géneros *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Rhizobium* y *Sinorhizobium* (Pathak *et al.*, 2017). La

FIGURA 2



Hojas características de los árboles de leguminosas del desierto
Fuente: Elaboración propia.

osmoadaptación del hospedador y sus rizobios es esencial para mantener una simbiosis y una fijación de N_2 efectivas (Pathak *et al.*, 2017).

Se han realizado varios esfuerzos para documentar las poblaciones de leguminosas y de otras plantas en los desiertos chihuahuense y sonorense. En México, destacan la red de Herbarios del Noroeste de México (<https://herbanwmex.net/portal/index.php>), las iniciativas de diferentes grupos de investigación del noreste de México para documentar la flora del Bolsón de Mapimí y de la región de Cuatro Ciénegas, el trabajo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) y las investigaciones de Arenas-Navarro *et al.* (2020) para estudiar la riqueza de las especies de leguminosas en México. Con estas acciones se tendrá un mejor conocimiento de todas las leguminosas existentes en el país.

En Estados Unidos existen bases de datos importantes para las plantas del desierto de sureste del país (<http://southwestdesertflora.com/How%20to%20Cite%20Us.html>), así como las bases de datos de las universidades de Arizona (The University of Arizona) y del Norte de Arizona (Northern Arizona University). La Escuela de Agricultura de la Universidad de Arizona estableció el Programa de las Leguminosas del Desierto en 1988, y desde entonces ha estudiado e intervenido en la conservación de las diferentes especies de los desiertos sonorense y

chihuahuense, del lado estadounidense. También son importantes las iniciativas binacionales de Pronatura, The Nature Conservancy y la World Wide Fund for Nature (WWF), entre otras.

Los ríos son muy importantes para la diversidad de especies de leguminosas; por ejemplo, a lo largo del río Bravo existen más de 150 especies pertenecientes a 54 géneros, siendo los más abundantes, *Dalea* (16 especies), *Astragalus* (13 especies), *Acacia* (10 especies), *Mimosa* (10 especies) y *Senna* (10 especies) (Johnson, 2006). En las montañas de Tucson habitan 53 especies de leguminosas, mientras que la frontera entre Sonora y Arizona está poblada por los géneros *Acacia*, *Cercidium*, *Parkinsonia* y *Prosopis*, entre otros (Web y Turner, 2020). En la ciudad de Tucson, Arizona, destaca el esfuerzo por preservar este tipo de vegetación en la mayoría de los jardines (Dimmitt, 2015).

La familia Leguminosae es un grupo monofilético que proviene de un ancestro común (Yahara *et al.*, 2013). Anteriormente se dividía en tres subfamilias, *Caesalpinioideae*, *Mimosoideae* y *Papilionoideae*, distinguidas por sus caracteres morfológicos, en particular florales (Avilés-Peraza, 2016). Posteriores análisis moleculares revelaron divergencias filogenéticas que hacen necesaria la división en seis subfamilias, para que cada una de ellas provenga a su vez de un ancestro común (Azani *et al.*, 2017; Kajita *et al.*, 2000; Yahara *et al.*, 2013). No obstante, gran parte de las listas florísticas no se han actualizado, por lo que el cuadro 1 presenta a las especies que pueden encontrarse en uno o ambos desiertos (chihuahuense o sonoreense), divididas en las subfamilias originales.

CUADRO 1
ESPECIES PRESENTES EN LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE
Y SONORENSE, Y SUBFAMILIAS A LAS QUE PERTENECEN

Caesalpinioideae	Mimosoideae	Papilionoideae
<i>Bauhinia lunarioides</i>	<i>Acacia angustissima</i> var. <i>hirta</i> <i>Acacia angustissima</i> var. <i>texensis</i> <i>Acacia berlandieri</i>	<i>Astragalus allochorus</i>
<i>Caesalpinia cacalaco</i>	<i>Acacia cochliacantha</i>	<i>Astragalus amphioxys</i> <i>Astragalus brazoensis</i>
<i>Caesalpinia caladenia</i>	<i>Acacia constricta</i>	<i>Astragalus crassicaarpus</i> var. <i>crassicaarpus</i>

Leguminosas de los desiertos Chihuahuense y Sonorense...

CUADRO 1
 ESPECIES PRESENTES EN LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE
 Y SONORENSE, Y SUBFAMILIAS A LAS QUE PERTENECEN (continuación)

Caesalpinioideae	Mimosoideae	Papilionoideae
<i>Caesalpinia caudata</i>	<i>Acacia farnesiana</i>	<i>Astragalus emoryanus</i> var. <i>emoryanus</i>
<i>Caesalpinia coriaria</i>	<i>Acacia gregii</i> var. <i>gregii</i>	<i>Astragalus emoryanus</i> var. <i>terlinguensis</i>
<i>Caesalpinia mexicana</i>	<i>Acacia gregii</i> var. <i>wrightii</i> <i>Acacia neovernicosa</i>	<i>Astragalus giganteus</i>
<i>Caesalpinia palmeri</i>	<i>Acacia rigidula</i>	<i>Astragalus leptocarpus</i> <i>Astragalus mollisumus</i> var. <i>bigelovii</i>
<i>Caesalpinia virgata</i>	<i>Acacia roemeriana</i>	<i>Astragalus mollissimus</i> var. <i>earlei</i>
<i>Cercis canadensis</i> var. <i>mexicana</i>	<i>Acacia schaffneri</i>	<i>Astragalus mollissimus</i> var. <i>marcidus</i>
<i>Chamaecrista calycioides</i> <i>Chamaecrista fasciculata</i> <i>Chamaecrista flexuosa</i> var. <i>texana</i>	<i>Acacia schottii</i>	<i>Astragalus nuttallianus</i> var. <i>austrinus</i>
<i>Chamaecrista nictitans</i> var. <i>mensalis</i>	<i>Calliandra californica</i>	<i>Astragalus nuttallianus</i> var. <i>macilentus</i>
<i>Eysenhardtia texana</i>	<i>Calliandra conferta</i>	<i>Astragalus nuttallianus</i> var. <i>nuttallianus</i>
<i>Hoffmannseggia</i> <i>drepanocarpa</i> <i>Hoffmannseggia glauca</i> <i>Hoffmannseggia oxycarpa</i> <i>Parkinsonia aculeata</i>	<i>Calliandra emarginata</i>	<i>Astragalus nuttallianus</i> var. <i>trichocarpus</i>
<i>Parkinsonia florida</i>	<i>Calliandra eriophylla</i>	<i>Astragalus nuttallianus</i> var. <i>zapatensis</i>
<i>Parkinsonia mycrophylla</i>	<i>Calliandra humilis</i> var. <i>humilis</i> <i>Desmanthus cooleyi</i>	<i>Astragalus pictiformis</i>
<i>Parkinsonia texana</i> var. <i>macra</i> <i>Parkinsonia texana</i> var. <i>texana</i>	<i>Desmanthus obtusus</i>	<i>Astragalus reflexus</i>
<i>Pomaria brachycarpa</i>	<i>Desmanthus velutinus</i> <i>Desmanthus virgatus</i>	<i>Astragalus waterfallii</i>

CUADRO I
 ESPECIES PRESENTES EN LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE
 Y SONORENSE, Y SUBFAMILIAS A LAS QUE PERTENECEN

(continuación)

Caesalpinioideae	Mimosoideae	Papilionoideae
<i>Pomaria jamesii</i>	<i>Ebenopsis ebano</i>	<i>Astragalus wootonii</i> var. <i>wootonii</i>
<i>Pomaria melanosticta</i>	<i>Havardia pallens</i>	<i>Baptisia bracteata</i> var. <i>laevicaulis</i>
<i>Senna armata</i>	<i>Leucaena leucocephala</i>	<i>Brongniartia minutifolia</i>
<i>Senna baubinioides</i>	<i>Leucaena retusa</i>	<i>Calia secundiflora</i>
<i>Senna covesii</i>	<i>Lysiloma watsonii</i>	<i>Canavalia maritima</i>
<i>Senna durangensis</i>	<i>Mimosa aculeaticarpa</i>	<i>Centrosema virginiana</i>
<i>Senna lindheimeriana</i>	<i>Mimosa asperata</i>	<i>Cologania angustifolia</i>
<i>Senna pumilio</i>	<i>Mimosa biuncifera</i>	<i>Crotalaria incana</i>
<i>Senna roemeriana</i>	<i>Mimosa borealis</i>	<i>Cotalaria punila</i>
<i>Senna wislizenii</i>	<i>Mimosa dysocarpa</i>	<i>Coursetia axilaris</i>
	<i>Mimosa emoryana</i>	<i>Coursetia glandulosa</i>
	<i>Mimosa malacocarpa</i>	<i>Dalea argyrea</i>
	<i>Mimosa strigillosa</i>	<i>Dalea aurea</i>
	<i>Mimosa texana</i>	<i>Dalea bicolor</i>
	<i>Mimosa turneri</i>	<i>Dalea candida</i> var. <i>oligophylla</i> <i>Dalea emarginata</i>
	<i>Mimosa wherryana</i>	<i>Dalea formosa</i>
	<i>Mimosa zygophylla</i>	<i>Dalea frutescens</i>
	<i>Neptunia pubescens</i> var. <i>pubescens</i>	<i>Dalea greggii</i>
	<i>Prosopis glandulosa</i> var. <i>glandulosa</i>	<i>Dalea hospes</i>
	<i>Prosopis glandulosa</i> var. <i>torreyana</i>	<i>Dalea lachnostachya</i>
	<i>Prosopis juliflora</i>	<i>Dalea lanata</i> var. <i>lanata</i>
	<i>Prosopis pubescens</i>	<i>Dalea lanata</i> var. <i>terminalis</i>
	<i>Prosopis reptans</i> var. <i>cinerascens</i>	<i>Dalea lasiathera</i>
	<i>Prosopis velutina</i>	<i>Dalea molis</i>
	<i>Schrankia latidens</i>	<i>Dalea nana</i> var. <i>nana</i>

CUADRO 1
 ESPECIES PRESENTES EN LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE
 Y SONORENSE, Y SUBFAMILIAS A LAS QUE PERTENECEN

(continuación)

Caesalpinioideae	Mimosoideae	Papilionoideae
<i>Senna wislizenii</i>	<i>Schrankia roemeriana</i>	<i>Dalea neomexicana</i> var. <i>neomexicana</i>
		<i>Dalea neomexicana</i> var. <i>longipila</i> <i>Dalea obovata</i>
		<i>Dalea pogonathera</i>
		<i>Dalea scandens</i> var. <i>paucifolia</i>
		<i>Dalea turberculata</i>
		<i>Dalea wrightii</i>
		<i>Desmodium grahamii</i>
		<i>Desmodium neomexicanum</i>
		<i>Desmodium psilophyllum</i>
		<i>Erythrina herbacea</i>
		<i>Erythrina flabeliformis</i>
		<i>Eysenhardtia spinosa</i>
		<i>Eysenhardtia texana</i>
		<i>Galactia canescens</i>
		<i>Galactia texana</i>
		<i>Galactia volubilis</i>
		<i>Galactia wrightii</i>
		<i>Genistidium dumosum</i>
		<i>Indigofera lindheimeriana</i>
		<i>Indigofera miniata</i>
		<i>Lespedeza texana</i>
		<i>Lotus oroboides</i>
		<i>Lupinus concinnus</i>
		<i>Lupinus havardii</i>
		<i>Lupinus texensis</i>
		<i>Macroptilium</i> <i>atropurpureum</i>
		<i>Olneya tesota</i>
		<i>Peteria scoparia</i>

CUADRO 1
 ESPECIES PRESENTES EN LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE
 Y SONORENSE, Y SUBFAMILIAS A LAS QUE PERTENECEN

(continuación)

Caesalpinioideae	Mimosoideae	Papilionoideae
<i>Senna wislizenii</i>	<i>Schrankia roemeriana</i>	<i>Phaseolus angustissimus</i>
		<i>Phaseolus filiformis</i>
		<i>Phaseolus grayanus</i>
		<i>Phaseolus maculatus subsp. ritensis</i>
		<i>Psoralidium tenuiflorum</i>
		<i>Psorothamnus fremontii</i>
		<i>Psorothamnus scoparius</i>
		<i>Psorothamnus spinosus</i>
		<i>Robinia neomexicana</i>
		<i>Rynchosia americana</i>
		<i>Rynchosia minima</i>
		<i>Rynchosia senna</i> var. <i>texana</i>
		<i>Sesbania drummondii</i>
		<i>Sesbania macrocarpa</i>
		<i>Sophora arizonica</i>
		<i>Sophora nuttalliana</i>
		<i>Sophora secundiflora</i>
		<i>Sophora tomentosa</i>
		<i>Tephrosia lindheimeri</i>
		<i>Tephrosia tenella</i>
		<i>Vicia ludoviciana subsp. ludoviciana</i>
		<i>Vigna luteola</i>
		<i>Zornia bracteata</i>

Con información de la base de datos de plantas del suroeste de Estados Unidos (<http://southwestdesertflora.com/How%20to%20Cite%20Us.html>); Johnson (2006) y Herbarios del Noroeste de México (<https://herbanwmex.net/portal/index.php>).

Las leguminosas arbóreas de los desiertos chihuahuense y sonoreense sirven de “plantas nodrizas” al facilitar el establecimiento de otras especies bajo su sombra, con lo que mejoran sus condiciones hidrológicas y la fertilidad del suelo (nutrientes, microbiota) que las acoge, y producen

microhábitats protegidos de temperaturas extremas y radiación solar (Carrillo-García *et al.*, 1999; Garcillán *et al.*, 2003b). *Prosopis laevigata*, *P. glandulosa*, *P. juliflora*, *P. reptans*, *P. articulata*, *P. palmeri*, *P. velutina*, *P. pubescens*, *Mimosa biuncifera*, *M. lacerata*, *M. luisana*, *M. texana* y *Olneya tesota* son ejemplos de plantas nodriza (Rodríguez-Sauceda *et al.*, 2014; Soliveres *et al.*, 2012; Suzán *et al.*, 1996).

La diversidad de especies de leguminosas alcanza su nivel más alto en el sur de Arizona y centro de Sonora, del Desierto Sonorense y a lo largo del río Bravo, en la parte de Texas, del Desierto Chihuahuense (Johnson, 2006). Los árboles mimosoides ocupan un lugar destacado en estos dos biomas, donde destaca *Prosopis*, mientras que, después de las lluvias, las partes llanas se cubren de plantas anuales como *Lupinus* y *Lotus* (Johnson, 2006; López-García, 2017). En el cuadro 2 se presentan ejemplos de especies de leguminosas encontradas en los dos desiertos. Para más información, pueden consultarse las páginas antes citadas.

CUADRO 2
CARACTERÍSTICAS DE ALGUNAS DE LAS ESPECIES DE LEGUMINOSAS
ENCONTRADAS EN LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE Y SONORENSE

Nombre científico y nombre común	Hábitat	Características
<i>Acacia angustissima</i> Kuntze Palo de pulque, Barbas de chivo, Guajillo, Acacia de la pradera, Acacia bola blanca, Palo de pulque. Tepeguaje, Timbre	Desierto Chihuahuense: Chihuahua Durango Coahuila, Nuevo León Tamaulipas, San Luis Potosí Desierto Sonorense: Arizona, Sonora, Baja California, Sureste de EE.UU.	Arbusto, subarbusto o árbol (1.8 m), nativo, perenne, de rizomas leñosos; crece en laderas rocosas (900-1 900 m) de suelos alcalinos; sin espinas, hojas verdes pinnadas de follaje plumoso, flores esféricas o globosas, blanco cremoso; vainas de 3-7 cm. Importante para aves silvestres, insectos y abejas.
<i>Acacia greggii</i> A. Gray (<i>Senegalia greggii</i>) Uña de gato de Acacia, Tésota, Gatuña, Palo Chino, Algarroba, Tepame	Desierto Chihuahuense: Durango Coahuila, Chihuahua, Texas, Nuevo México Desierto Sonorense: Arizona, Sonora y Baja California.	Árbol pequeño o arbusto grande (1.5- 4.0 m), nativo, perenne, de espinas afiladas; forma matorrales preferentemente a lo largo de arroyos (1 300 m); hojas verde grisáceas, caducifolias y bipinnadas; flores blanco cremoso, dispuestas en espiga; vaina retorcida de 5 a 12 cm.

CUADRO 2

CARACTERÍSTICAS DE ALGUNAS DE LAS ESPECIES DE LEGUMINOSAS

ENCONTRADAS EN LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE Y SONORENSE (continuación)

Nombre científico y nombre común	Hábitat	Características
<i>Acacia constricta</i> Benth Acacia de espino blanco	Desierto Chihuahuense: Chihuahua Coahuila, Nuevo Leon, Durango, San Luis, Potosí, Nuevo México Desierto Sonorense: Sonora, Arizona,	Árbol o arbusto (hasta 3 m); nativo; corteza lisa; espinas estipulares; hojas caducas, pinnadas; flores amarillo brillante con cabeza redondeada; vainas rojizas de 4.5 a 13.5 cm. Se encuentran en laderas y mesetas (610-1 981 m).
<i>Acacia millefolia</i> S. Watts. Tepemezquite	Desierto Chihuahuense: norte de Chihuahua Desierto Sonorense: Sonora; Arizona;	Árbol o arbusto (1 a 3 m) espinas estipulares rectas, en forma de aguja; hojas pinnadas; flores color crema en espigas; vainas planas y venosas de 7 a 15 cm. Se encuentra en cañones rocosos y en laderas de 1 219 a 1 676 m.
<i>Desmodium batocaulon</i> A. Gray Trébol de garrapata tupida, Trébol de garrapata de San Pedro, Trébol de garrapata	Desierto Chihuahuense: Chihuahua, algunos lugares de Durango Desierto Sonorense: Norte de Sonora y Sur de Arizona	Hierba nativa, perenne de tallos leñosos (1 m); estípulas conspicuas verdes, hojas pecioladas, compuestas, pinnadas; flores azules, lavanda, morado o violeta; pequeñas, muy llamativas, cigomorfas; vaina escasamente pubescente o glabra. Crece a altitudes de 900 a 1 900 m.
<i>Mimosa aculeaticarpa</i> Ortega (<i>Mimosa biuncifera</i> , <i>Mimosa acanthocarpa</i>) Mimosa de uña o garrá de gato	Desierto Chihuahuense: Texas, Nuevo México Desierto Sonorense: Arizona; Sonora	Arbusto o árbol pequeño (0.6-1 m). Nativo, perenne; espinas recurvadas emparejadas en los nudos; hojas verdes bipinnadas; flores rosadas o blancas en racimo capitado; vaina pequeña. Crece en matorrales en colinas y laderas de cañones y a lo largo arroyos (1 067-1 981 m).
<i>Parkinsonia aculeata</i> L Espina de Jerusalén, Guacaporo, Retama, Bagote, Huacapori, Junco Marino, Palo verde	Desierto Chihuahuense: Coahuila, Nuevo León, algunos lugares de Durango Desierto Sonorense: Sonora, Arizona; Baja California y Sur de California	Árbol perenne, nativo (-12 m); corteza verde lisa en las (ramas superiores) y marrón rugoso en tronco y ramas principales; espinas nodales que se vuelven glabras; hojas verdes bipinnadas; flores amarillas con motas basales naranja; vainas con pocas semillas. Se encuentra a lo largo de arroyos, llanuras arenosas u otras áreas bajas (914-1 372 m), donde el agua se acumula en el desierto bajo.

CUADRO 2
 CARACTERÍSTICAS DE ALGUNAS DE LAS ESPECIES DE LEGUMINOSAS
 ENCONTRADAS EN LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE Y SONORENSE (continuación)

Nombre científico y nombre común	Hábitat	Características
<i>Prosopis juliflora</i> var. <i>torreyana</i> Benson Mezquite de miel, mezquite, algarroba, chachaca	Desierto Chihuahuense: Chihuahua, Nuevo León Desierto Sonorense: Sonora, Arizona, Baja California	Especie amenazada. Árbol o arbusto (-10 m) nativo, perenne; ramas espinosas arqueadas y caídas, tallos en zigzag; hojas verdes pinnadas formando glabras; flores amarillas en espigas en forma de amento; vainas de 10-20 cm. Común en tierras bajas, en suelos pesados en tierras altas y suelos gruesos de llanuras arenosas. Se convierte en árbol en las tierras bajas, si el sistema de raíces tiene acceso al agua subterránea; permanece como un arbusto de <2 m en las tierras altas. Crece a 1 524 m.
<i>Prosopis pubescens</i>	Desierto Chihuahuense: Chihuahua, Texas, Coahuila	Árbol o arbusto (6 m); copa estrecha, ramas ascendentes, espinas presentes; hojas verdes, pubescentes, pinnadas compuestas; flor blanca-amarilla, en espiga; vaina enrollada; crece a alturas de 1 200 m en llanura aluviales bajas, fondos de arrollo, lavados de grava y suelos arenosos y salinos.
<i>Olneya tesota</i> A. Gray Palo fierro	Desierto Sonorense: especie endémica de Sonora, Baja California y Arizona	Especie, endémica sujeta a protección especial, considerada fósil viviente; árbol o arbusto (-10 m), perene, nativo del Desierto Sonorense; planta nodriza; espinas estipuladas; hojas verdes grisáceo, perennes; pinnadas; flor lavanda pálida; vainas de 8-9 cm. Crecen en los fondos planos de los cañones y colinas bajas, suelos con grava y limosos (950 m)

Con información obtenida de la base de datos de plantas del suroeste de Estados Unidos (<http://southwestdesertflora.com/How%20to%20Cite%20Us.html>) y Herbarios del Noroeste de México (<https://herbanwmex.net/portal/index.php>).

ETNOBOTÁNICA DE LAS LEGUMINOSAS DE LOS DESIERTOS DE CHIHUAHUENSE Y SONORENSE

El uso de plantas para diversos fines por parte de las comunidades indígenas y locales comprende el conocimiento etnobotánico tradicional, que se ha transmitido de forma oral y vertical de generación en generación (Kumar *et al.*, 2021). Los etnobotánicos y las evidencias paleontológicas, arqueológicas y arqueogenéticas han contribuido de manera significativa a desentrañar las interacciones humano-planta desde tiempos prehistóricos. De acuerdo con Kumar *et al.* (2021), el conocimiento etnobotánico tradicional puede contribuir al fin de la pobreza, al combate del hambre, a la mejora de la salud y el bienestar, el consumo y la producción responsables, a la conservación de los ecosistemas terrestres y para acciones contra el cambio climático. Para lograrlo, se requiere de esfuerzos concertados de todas las partes interesadas relevantes, incluidas las comunidades indígenas, los ciudadanos comunes, los científicos, los formuladores de políticas y los líderes mundiales.

La interacción humano-leguminosa fue fundamental para la sobrevivencia de los pueblos indígenas que habitaron en los desiertos chihuahuense y sonorenses. El valor nutricional y características organolépticas (sabor, color, textura) de vainas y semillas permitieron su incorporación a la dieta de humanos y de animales (Yetman y Van Devender, 2002; Nabhan, 2015). Otras partes de las plantas se usan para elaborar vestimenta, construir refugios, obtener combustible y remedios medicinales (Nabhan, 1985). Un ejemplo es el mezquite (“árbol de la vida”); la dureza de su madera representa para los mayos la fortaleza espiritual y forma diaria de vivir (Fritz, 1999; Yetman y Van Devender, 2002). De la corteza se obtienen tintes y fibras para fabricar canastas y sogas. La goma de sus árboles (que en Sonora llaman chúcata) sirve como golosina y también como pegamento (Fritz, 1999; Merrill, 2009; Yetman y Van Devender, 2002). Sin embargo, el uso como combustible, es el que actualmente está acabando con esta especie (De la Torre y Sandoval, 2014).

Especies utilizadas en la alimentación

Los géneros *Acacia*, *Prosopis*, *Olneya tesota* y *Parkinsonia* han sido utilizados como alimento por diferentes tribus de los desiertos chihuahuense y sonorense (cuadro 3). Las vainas y semillas se comen preferentemente molidas. La harina resultante, rica en fibra y proteína, y baja en grasa, se usa en panadería y elaboración de bebidas (Nabhan, 2015; Yetman y Van Devender, 2002). Por ejemplo, las harinas de *Vachellia farnesiana* (huizache) contienen 25.12% de proteína, 18.29% de fibra y 3.31% de grasa; el contenido de proteína en especies de *Caesalpinia* y *Senna* se encuentra entre 17 y 18% (Sotelo, 1996). En semillas de *Olneya tesota* (palo fierro), *Mimosa grahamii* (gatuña) y *Prosopis juliflora* (mezquite), Ortega-Nieblas *et al.* (1996) encontraron 19.5%, 30.1% y 28.7% de proteína, respectivamente, con digestibilidades entre 70 y 80%, siendo la más baja para el mezquite (comparable a la de la proteína de chícharo).

CUADRO 3

EJEMPLO DE ESPECIES DE LEGUMINOSAS DE LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE Y SONORENSE EN LA ALIMENTACIÓN POR ALGUNAS CIVILIZACIONES ANCESTRALES

Especie	Etnia
<i>Acacia greggii</i> A. Gray	Cahuillas, pimas la utilizan ocasionalmente como alimento moliendo los frutos inmaduros (los maduros contienen glucósidos cianogénicos); los seris (konkaak/comca'ac) combinan el fruto molido con aceite de león marino para hacer papillas; la tribu kumeyaay, de San Diego, los utilizaban para alimentación
<i>Parkinsonia aculeata</i> L.	Los pápagos tostaban los frijoles y los usaban como alimentos; los cahuillas, molienda de semilla, uso como harina; pimas los comían frescos o hervidos.
<i>Prosopis pubescens</i> Benth.	Cahuillas, pimas muelen semilla y usan como harina o la mezclan con agua y usan como bebida; también la usan como pinole (fruto tatemado y molido); pimas, vainas enteras tiernas.
<i>Olneya tesota</i> A. Gray	Se hace una papilla con la harina del fruto, que era consumida por los pueblos indígenas del suroeste de Estados Unidos y del estado de Sonora, en México. Las vainas tostadas se usan como harina para elaborar pan; los seris muelen los frijoles y los mezclan con agua y aceite de león marino para alimento.

Con datos de la base de datos de Etnobotánica de los nativos americanos (<http://naeb.brit.org/>).

Se recomienda combinar leguminosas con cereales para suplir la deficiencia de metionina de las leguminosas. Este aminoácido debe consumirse en la dieta, ya que los humanos no podemos sintetizarlo (Nelson y Cox, 2017). Las especies silvestres de *Lupinus* sy *Phaseolus* spp., como *P. lunatus* silvestre, llegan a tener hasta 25% de proteína. No obstante, las leguminosas silvestres pueden contener factores anti-nutricionales, como inhibidores de tripsina, lectinas, alcaloides, fenoles y saponinas, que pueden afectar la absorción de proteínas (Ortega-Nieblas, 1993). En un estudio con siete leguminosas del Desierto Sonorense (huizache, mezquite, palo verde, palo fierro, palo de brea, gatuña), Ortega Nieblas (1993) encontró actividades de inhibidor de la tripsina por arriba de los reportados para la soya. Sin embargo, al aplicar calentamiento a las harinas, la actividad del inhibidor disminuyó y la digestibilidad de la proteína de las semillas analizadas aumentó de manera significativa.

Con excepción de *Mimosa grahamii* (uña de gato), el contenido de otros factores anti-nutricionales en las semillas consumidas por las tribus indígenas es similar al de los presentes en leguminosas cultivadas (Ortega-Nieblas, 1993). Esto indica que dichas leguminosas del desierto pueden seguirse consumiendo como alimento, de manera sustentable, como lo hicieron las civilizaciones antiguas. Para ello, es necesario vincular políticas económicas, ecológicas y socioculturales para lograr aprovechamientos sostenibles, tomando en cuenta el Protocolo de Nagoya o diversas propuestas dentro de la bioprospección y la etnobotánica aplicada para el entendimiento del rol de las comunidades y su conocimiento etnobotánico para su uso y aprovechamiento (Kumar *et al.*, 2021).

Especies utilizadas en la medicina tradicional

Las leguminosas se han utilizado desde tiempos precolombinos, con fines medicinales, para tratar enfermedades de los sistemas digestivo, respiratorio, reproductor, urinario, circulatorio y nervioso; de la piel, dentales y neoplasias, entre otras (Delgado-Salinas *et al.*, 2021; Hastings, 1990). Documentar el conocimiento médico indígena y el estudio científico de las medicinas indígenas y compartir este conocimiento son algunas de las prioridades del Protocolo de Nagoya para mejorar la

investigación etnofarmacológica actual y promover el aprovechamiento sustentable (Kumar *et al.*, 2021; Ningthoujam *et al.*, 2012). En este sentido, la información que pueden aportar los especímenes de plantas silvestres conservados por el Herbario Nacional (MEXU) del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México y sus reportes de uso son muy valiosos. Delgado-Salinas *et al.* (2021) analizaron la relación entre los usos de las leguminosas silvestres mexicanas y sus agrupaciones jerárquicas taxonómicas. Estos autores encontraron registro en MEXU para 525 especies de leguminosas con identidad verificada, de las cuales el 66.8% (351 especies) presentaron reportes de usos medicinales.

A pesar de que los registros en el MEXU de leguminosas silvestres que crecen en los desiertos chihuahuense y sonorense son pocos (5.9%), los géneros de las plantas medicinales utilizadas en diferentes partes de México son comunes, y su uso se relaciona con el contenido de fitoquímicos o metabolitos secundarios con diferentes actividades biológicas (Delgado-Salinas *et al.*, 2021; Winck, 2013). En la subfamilia *Caesalpinioideae*, las especies con más reportes de uso medicinal pertenecen a los géneros *Senna*, *Acacia* (*Vachellia*), *Mimosa* y *Prosopis*, mientras que en *Papilionoideae* destacan *Dalea* y *Eysenhardtia*, *Diphysa*, *Erythrina* e *Indigofera* (Delgado-Salinas *et al.*, 2021; Hastings, 1990).

Las hojas y vainas de algunas especies de *Senna* fueron utilizadas por los nativos americanos como laxantes, la corteza para padecimientos periodontales y las infusiones de sus raíces para curar heridas (Hatfield, 2004; Waizel-Bucay y Martínez, 2011). Las hojas de *Acacia* para padecimientos periodontales e infecciones de garganta (Rosas-Duarte, 2015). Las raíces de *Astragalus* como analgésico y anticonvulsivo y las de *Dalea* como analgésico (Camazine y Bye, 1980; Elmore, 1944). *Prosopis* es el género más utilizado por los indígenas de ambos desiertos; la corteza, para curar heridas y tratar la diarrea; las hojas para tratar picaduras de insectos y problemas oculares y la goma para prevenir infecciones oculares y de la piel (Camazine y Bye, 1980; Curtin, 1984; Rosas-Duarte, 2015).

En el cuadro 4 se presentan algunos ejemplos de especies de leguminosas y sus usos medicinales. Una información más detallada puede encontrarse en las recopilaciones sobre la etnobotánica de los mayos, seris y rarámuris (Bye, 2004; Merrill, 2009; Yetman y Van Devender, 2000), así como en la base de datos de Etnobotánica de los nativos americanos

(<http://naeb.brit.org/>). Sin embargo, es conveniente resaltar la necesidad de llevar a cabo una actualización de la contribución de las leguminosas de los desiertos chihuahuense y sonoreense a la herbolaria medicinal mexicana, que incluya la nueva clasificación taxonómica y cuya información esté más accesible tanto para ampliar los estudios sobre el valor medicinal de los compuestos bioactivos presentes en estas especies como para promover su aprovechamiento sostenible.

CUADRO 4
USOS MEDICINALES DE LEGUMINOSAS
DE LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE Y SONORENSE

Nombre científico y común	Remedio	Modo de uso
<i>Acacia cochliacantha</i> Humb. & Bonpl. Chirajo, güinolo, chírahui	Problemas urinarios y de próstata.	Infusión (té de espinas).
<i>Acacia gregii</i> A. Gray Uña de gato; Tis	Infección de garganta.	Infusión (té).
<i>Cassia covessi</i> A. Gray Hehe quiínla, hoja sen	Para gripa; limpieza de estómago y riñón; picadura de alacrán y viuda negra; sarampión.	Infusión (té de raíz). Té de hojas y tallos para afecciones de hígado.
<i>Cercidium microphyllum</i> Rose & Johnst Palo verde; Ziipxöl	Diabetes.	Infusión: té de ramas.
<i>Dalea mollis</i> Benth Dalea; Hanaj itàmt	Várices y ciática.	Cataplasma: la planta machacada disminuye la hinchazón de las várices.
<i>Erythrina flabelliformis</i> Kearney Jévero; Chilicote, Flor de Mayo; Peonía; Coralbean	Diarrea y picadura de alacrán.	Semillas verdes tostadas.
<i>Mariosousa heterophylla</i> Seigler & Ebinger Palo blanco; Cap	Caída del cabello.	Se machacan las hojas y se añaden a preparación para champú.
<i>Parkinsonia praecox</i> Hawkins Brea; Maas	Ayuda a expulsar la placenta. Contusiones y esguinces.	Infusión: té de corteza para expulsar placenta. Loción: corteza mezclada con sal, tierra y aceite de tortuga para las contusiones y esguinces.

CUADRO 4
 USOS MEDICINALES DE LEGUMINOSAS
 DE LOS DESIERTOS CHIHUAHUENSE Y SONORENSE *(continuación)*

Nombre científico y común	Remedio	Modo de uso
<i>Piscidia mollis</i> Rose Joopo, Palo blanco	Epilepsia.	Infusión (té de flores).
<i>Pithecellobium confine</i> Standl Heejac	Resfriado, dolor de garganta, tos.	Infusión; té de vaina seca.
<i>Prosopis glandulosa</i> Haas Mezquite	Úlcera, paño, ojos, laxante.	Gotas: se hacen gotas con goma de árbol disuelta en agua y filtrada. Cocción: Goma molida y cocida mezclada con comida para úlcera. Infusión: té de ramas verdes.
<i>Prosopis juliflora</i> Sw Mezquite	Diarrea, inflamación gastrointestinal.	Infusión de hojas, flores vainas y corteza.
<i>Prosopis pubescens</i> Benth Mezquite	Problemas de menstruación.	Infusión de raíces para problemas menstruación; polvo de raíz para curar heridas.
<i>Senna atomaria</i> (L.) Irwin & Barneby Jupachumi; "Skunk's Ass" Palo zorrillo	Diabetes.	Infusión (té de hojas y frutos).

Con información de Bye (2004) y Rosas-Duarte (2015).

Alimento para animales

En general, las mismas especies que emplearon los pueblos antiguos para alimento humano se usaron para alimento animal. Las especies de *Prosopis* se siguen utilizando hasta la fecha para alimentar cabras en la Comarca Lagunera de Coahuila (Rodríguez-Sauceda *et al.*, 2014). Las hojas y ramas tiernas de *Acacia berlandieri*, *A. farnesiana*, *A. greggii*, *Dalea greggii*, *Eysenhardtia texana*, *Leucaena leucocephala* y *Parkinsonia aculeata* se usan como forraje en Nuevo León (Estrada-Castillón *et al.*, 2014).

Utilización de madera para construcción, artefactos, artesanías y combustible

La madera de *Prosopis* se utiliza para la fabricación de tablones, cercas, durmientes y corrales (Rosas-Duarte, 2015). Los pimas, mayos y seris, la utilizaron para la elaboración de artefactos y utensilios de cocina y para el tallado de madera (Curtin, 1984). El palo zorrillo (*Senna atomaria*) y el palo fierro (*Olneya tesota*) se usan como vigas para construir casas (Merrill, 2009). Los troncos y ramas de las especies de *Acacia*, *Parkinsonia* y *Cercidium* se utilizan por los mayos para la fabricación de cercas y corrales (Bye, 2004; Merrill, 2009).

Los seris (*comcáac*) utilizaron las ramas de *Olneya tesota* para tallar figuras de madera que, junto con la producción de cestas, se convirtieron en la forma de vida de esta tribu durante los años 70 del siglo XX (Curtin, 1984; Merrill, 2009). El tallado manual requiere de meses de trabajo y de árboles de más de cien años para obtener figuras de calidad. El éxito de los *comcáac* produjo la aparición de figuras talladas con torno, con las que la tribu no pudo competir; comúnmente, los productores de éstas talan todo el árbol, comprometiendo al recurso (Rosas-Duarte, 2015). Es necesaria la concertación de todos los actores para establecer políticas de protección y uso racional que permitan un aprovechamiento sustentable (Kumar *et al.*, 2021).

Entre las acciones que es necesario impulsar, está la del uso racional de *Prosopis* para la producción de carbón (Taylor, 2008). Únicamente en Sonora existen 157 carboneras que producen más del 65% del carbón del país, sin contar las clandestinas (Comisión Nacional Forestal/Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Conafor / Semarnat, 2009). Otros estados productores son Baja California, Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí (Taylor, 2008). En el Desierto Sonorense también se produce carbón a partir de la leña del palo verde y del palo fierro, por lo que urge establecer medidas adecuadas para su uso racional y posible restauración (Conafor / Semarnat, 2009).

Metabolitos secundarios y proteínas de defensa con actividad biológica

Los metabolitos secundarios (MS) presentes en las plantas contribuyen de modo significativo a la medicina herbal, debido a sus diferentes actividades biológicas (Isah, 2019). Los principales metabolitos secundarios presentes en las leguminosas silvestres son polifenoles (flavonoides, isoflavonas, catequinas, antocianinas), terpenoides, alcaloides, aminas, péptidos y saponinas (Ku *et al.*, 2020). La actividad antioxidante de las vainas de mezquite se debe al flavonoide apigenina (González-Barrón *et al.*, 2020).

Otros flavonoides presentes son C-glicosil flavonas (schaftosido isoschaftosido, vicenina II, vitexina e isovitexina) con actividad antioxidante, antiinflamatoria y neuroprotectora (Cattaneo *et al.*, 2014). Valli *et al.* (2014) identificaron alcaloides de piperidina en hojas de *Prosopis juliflora* que inhibieron el crecimiento de *Cryptococcus neoformans*, hongo que infecta a los pulmones de personas inmunosuprimidas. Las hojas de mezquite también contienen ácido gálico, catequina, galocatequina, epicatequina, rutina y luteonina, todos ellos antioxidantes relacionados con la salud del corazón (García-Andrade *et al.*, 2013).

Dalea frutescens contiene chalconas isopreniladas que *in vitro* muestran actividad contra células de cáncer de próstata (Shaffer *et al.*, 2016), mientras que los frutos de *Caesalpinia microphylla* contienen taninos (ácido malotínico, isómeros de geranina, ácido quínico), que presentan actividad anti-*Trichomona vaginalis* (Silva *et al.*, 2020). El metil galato extraído de los frutos de *C. coriaria* demostró inhibir *in vitro* el crecimiento de *Pseudomonas aeruginosa* (Olmedo-Juárez *et al.*, 2019).

Las investigaciones llevadas a cabo hasta el momento son un indicio del potencial medicinal de las leguminosas de los desiertos chihuahuense y sonorense. Sin embargo, deben realizarse primero ensayos en modelos animales para ver si el efecto persiste y si no se presenta algún tipo de toxicidad. Posteriormente, estos estudios deben complementarse con el establecimiento de fórmulas magistrales y su posología, y con los ensayos clínicos con humanos, establecidos para determinar la eficacia de un medicamento (Tong *et al.*, 2013).

Otro potencial biológico interesante son las proteínas de defensa de las semillas de las leguminosas del desierto. Algunas de estas proteínas pueden controlar la proliferación de diferentes plagas que atacan a la

agricultura como insectos y nemátodos (Vázquez-Moreno *et al.*, 2002). Por ejemplo, una de las lectinas de semillas de palo fierro (PF2) inhibe la ovoposición de *Zabrotes subfasciatus*, el principal brúquido (gorgojo) que ataca al frijol después de la cosecha, el cual provoca pérdidas de alrededor del 30% de esta leguminosa, tan importante en la alimentación del mexicano (Lagarda *et al.*, 2012). El desarrollo de bioplaguicidas podría estimular la modernización de la agricultura de una manera sustentable (Leng *et al.*, 2011). El potencial bionsecticida de la lectina PF2 es una razón más para proteger al árbol de palo fierro y para buscar los consensos y estrategias adecuadas para su aprovechamiento.

Proteínas y carbohidratos de leguminosas del desierto con aplicaciones nutricionales y tecnológicas

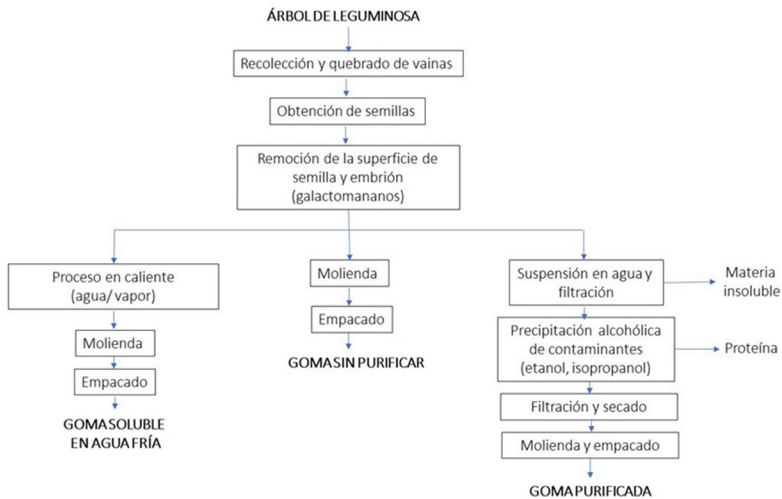
La concentración de proteína en las semillas de las leguminosas del desierto va del 17 al 30%. Los tratamientos térmicos tradicionales pueden inactivar a los componentes antifisiológicos presentes en estas semillas (Ortega-Nieblas, 1993). Además del potencial nutricional, pueden obtenerse concentrados, aislados y péptidos con funcionalidad específica (capacidades emulsificantes, espumantes, antioxidantes, bactericidas, antiinflamatorias). Cattaneo *et al.* (2014) obtuvieron aislados de proteína ($62.1 \pm 6.2\%$) a partir de harina de cotiledón de semillas de *Prosopis alba*, cuyos hidrolizados mostraron buenas propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Estas propiedades pueden aprovecharse para desarrollar alimentos que mejoren la salud de la población.

Otro componente importante de las leguminosas del desierto son los carbohidratos con potencial tecnológico para ser utilizados en las industrias alimentaria y farmacéutica, como las gomas de las semillas y los exudados del tronco de las leguminosas (Barak y Mudgil, 2014). Las gomas del endospermo de las semillas de leguminosas contienen manosas unidas por enlaces β 1-4, con diferentes grados de ramificación con galactosas en α 1-6 (Mamone *et al.*, 2019). Varios de estos galactomananos se comercializan mundialmente, como la goma de algarrobo (*Ceratonia siliqua*), la goma tara (*Caesalpinia spinosa*), la goma guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) y, más recientemente, el algarrobo sudamericano de

Prosopis alba, *P. nigra*, *P. pallida* y *P. rusciflora* (Guillon y Champ, 2007; Harris y Smith, 2006).

Estas gomas se usan como estabilizantes de alimentos y medicamentos y como suplementos de fibra soluble (Guillon y Champ, 2007). Además, sus hidrolizados actúan como prebióticos que estimulan el crecimiento del microbioma intestinal y mejoran la salud (Cruz-Rubio *et al.*, 2018). En la figura 3 se presenta un diagrama general con las operaciones para la obtención de estas gomas. Para mejorar su solubilidad en agua fría, se les da un tratamiento térmico. Para propósitos farmacéuticos, es recomendable darles un proceso de purificación (Barak y Mudgil, 2014).

FIGURA 3



Operaciones generales para la extracción de gomas de las semillas de leguminosas del desierto.
Fuente: Modificado de Barak & Mudgil (2014).

Algunas leguminosas del desierto exudan hidrocoloides de sus troncos como mecanismo de defensa. Estos exudados contienen L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-manosa, D-glucuronato y D-xilosa, que se usa en las industrias alimentaria y farmacéutica (Patel y Goyal, 2015). La goma arábiga de *Acacia senegal* es la más utilizada comercialmente,

mientras que los exudados (goma) de *Prosopis laevigata* y *P. velutina* tienen una composición similar, por lo que tienen potencial tecnológico (López-Franco *et al.*, 2008).

En la parte mexicana de los desiertos chihuahuense (San Luis Potosí) y sonorense (Sonora), se obtienen exudados a partir de *P. laevigata* (2 000 toneladas/año) y *P. velutina* (800 toneladas/año), respectivamente (Goycoolea *et al.*, 2000; Mudgil y Barak, 2020). La obtención es artesanal y la colecta manual; las personas arrancan la “lágrima de goma” de la corteza del árbol, las clasifican, eliminando las más oscuras, las limpian eliminando todas las impurezas y las muelen con diferentes molinos hasta obtener un polvo fino que se disuelve en agua, se filtra y se seca por aspersión. En la figura 4 se presentan las lágrimas típicas de chúcata (a), la molienda inicial (b) y la goma molida, filtrada y secada por aspersión. Para lograr un mejor aprovechamiento de esta goma, es necesario tecnificar el proceso con la participación de los diferentes actores, para lograr un aprovechamiento sustentable (Mudgil y Barak, 2020).

FIGURA 4



Goma de exudado de mezquite (chúcata) en lágrima (a), molida en grano grueso (b) y goma molida, filtrada y secada por aspersión.

Fuente: Elaboración propia.

Planes de protección, conservación, restauración y manejo de las leguminosas del desierto en México

El gobierno mexicano ha desarrollado estrategias para proteger a la flora y fauna mexicanas. La Norma Oficial Mexicana 059 es el instrumento

normativo que identifica las especies o poblaciones de flora y fauna México en riesgo, clasificándolas en peligro (P) y amenaza (A) de extinción o protegidas (Pr) (MER) (Semarnat, 2010). De las diecisiete especies de leguminosas que se encuentran en la lista de riesgo, cuatro habitan en alguna de las regiones de los desiertos chihuahuense o sonorense: *Hesperalbizia occidentalis* (A), *Olneya tesota* (Pr), *Thermopsis montana* (A) y *Trifolium wormskioldii* (A). Además, existen 56 áreas naturales protegidas en las regiones que abarcan ambos desiertos, con 19 áreas específicas para la protección de la flora y la fauna. Para más detalles, puede consultarse la página oficial del Gobierno de México (<https://www.gob.mx/conanp/es/#1692>).

La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) es la entidad gubernamental que establece planes de monitoreo y conservación de estas áreas protegidas (Semarnat, 2010). Sin embargo, la falta de vinculación con otros programas gubernamentales de desarrollo, los centros de investigación y las poblaciones locales ha dificultado la aplicación de alternativas que favorezcan el desarrollo sustentable regional (Halffter, 2011).

Por otro lado, no se han presentado propuestas para incluir a más especies de leguminosas del desierto a la lista de especies en riesgo, y este hecho, aunado a la escasez de colecciones de estas especies en el MEXU y en los herbarios de las universidades situadas en regiones dentro de los desiertos chihuahuense y sonorense, podría estar reflejando una falta de información sobre la situación actual de las poblaciones de leguminosas en ambos desiertos (Delgado-Salinas *et al.*, 2021; Felger, 2020). La aplicación de herramientas como la georreferenciación y el apoyo a proyectos de investigación pueden contribuir a mejorar esta situación (Garcillán *et al.*, 2003a; 2003b). Otro punto importante es la amenaza potencial de especies invasoras, tanto en las áreas protegidas como en el resto del desierto (Ceccon *et al.*, 2015). La invasión de gramíneas puede amenazar la existencia de las plantas herbáceas nativas, entre ellas las leguminosas (Domínguez *et al.*, 2009).

Existe información documentada de que la biodiversidad de especies vegetales y animales se encuentra comprometida en más de la mitad del territorio mexicano (Carabias *et al.*, 2007; Conafor / Semarnat, 2009). Aunque México cuenta con instrumentos legales que se refieren a la restauración de la biodiversidad (Ley General del Equilibrio Ecológico; Ley de Protección al Ambiente, Desarrollo Forestal Sustentable; Ley

General de Vida Silvestre), hacen falta políticas públicas definidas para desarrollar acciones de restauración efectivas y vinculantes (Cecon *et al.*, 2015). Por ejemplo, en Sonora, la Secretaría de la Defensa Nacional (Sedena) y la Conafor han establecido viveros para la producción de plantas de mezquite y palo fierro que fueron plantadas sin darles un adecuado seguimiento debido a la falta de continuidad de los programas a través del tiempo (Conafor / Semarnat, 2009).

En contraste, Moreno *et al.* (2017) evaluaron la restauración con tres especies de leguminosas (*Prosopis articulata*, *Parkinsonia microphylla* y *Parkinsonia florida*) y cactus cardón, once años después de su siembra en un área degradada del Desierto Sonorense, estudiando el efecto de la disposición de la siembra (individual o combinada) y de la inclusión en el suelo de compost, hongos micorrícicos o bacterias promotoras del crecimiento. La información aportada por este y otros estudios es importante para una restauración exitosa, y evidencia la necesidad de vinculación con universidades y centros de investigación (Cecon *et al.*, 2015).

La sobreexplotación del mezquite en los desiertos chihuahuense y sonorense para la producción de carbón vegetal afecta a la biodiversidad del desierto por ser una especie nodriza, y puede acabar con el recurso (Ríos-Saucedo *et al.*, 2011). Es necesario entonces vincular a todos los actores para garantizar el aprovechamiento sustentable de las diferentes especies de *Prosopis*. En una propiedad privada de la Comarca Lagunera de Coahuila, se ha desarrollado una huerta de mezquite para su aprovechamiento integral. A partir de un plan de podas saneamiento y aclareo, se producen 700 kg de carbón/ha, 2 ton/ha de vaina para la alimentación de ganado caprino y 40 kg/ha de miel de abeja, sin desproteger a otras especies por la tala del mezquite (Blanco-Contreras, 2019). Éste es un ejemplo sustentable que puede ser reproducido en ejidos y comunidades rurales. Sin embargo, para ello se requieren intervenciones transdisciplinarias integradas por etnobotánicos, antropólogos, economistas, sociólogos, ecólogos, políticos y productores, que permitan el desarrollo de capacidades de los productores y planes de producción, y apoyos estatales que mejoren su calidad de vida, evitando que recurran a la tala indiscriminada (Cecon *et al.*, 2015).

México ha actualizado su Estrategia Nacional sobre Biodiversidad y su Plan de Acción 2016-2030 (ENBioMex) no sólo para promover la

recuperación de especies o grupos biológicos particulares, sino para la protección, restauración y uso sustentable de sus ecosistemas (Conabio, 2016). Además, se adhirió al Protocolo de Nagoya para proteger el acceso a los recursos genéticos y la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de su utilización. El establecimiento de políticas públicas claras y de un instrumento legal específico para la conservación de la biodiversidad, así como la búsqueda de cooperación internacional, son recomendaciones de los expertos (Carabias *et al.*, 2007; Ceccon *et al.*, 2015; Halffter, 2011), encaminadas a tener mejores resultados en la protección de las especies mexicanas, incluidas las leguminosas del desierto.

TENDENCIAS FUTURAS

En los desiertos chihuahuense y sonorense existe una gran diversidad de especies que aún no se estudian y otras que acaparan la atención en la actualidad. Existe la necesidad de actualizar su estatus con base en la taxonomía actual, georreferenciarlas e identificar si algunas se encuentran en riesgo para preservarlas adecuadamente. Para mejorar la adaptación de especies de leguminosas nativas (*Acacia*, *Olneya*, *Prosopis*) plantadas por instancias gubernamentales con propósito de reforestación, es necesario, además de dar un seguimiento al crecimiento de las plantas, potenciar las investigaciones sobre interacciones planta-microorganismo (hongos micorrícicos; bacterias potenciadoras del crecimiento) y sobre el efecto de plantarlas junto con otras plantas del desierto. El desarrollo de bioplaguicidas estimula la modernización de la agricultura y, sin duda, reemplazará gradualmente a los plaguicidas químicos. En este sentido, existe potencial para el desarrollo de bioinsecticidas a partir de compuestos obtenidos de sus semillas y para el desarrollo de procesos para aplicarlos.

Por otro lado, la tendencia al aumento del consumo de proteínas de origen vegetal y a la búsqueda de fitoquímicos con bioactividades con aplicaciones farmacéuticas y alimentarias ha aumentado el interés en el estudio de plantas silvestres y la utilidad que pueden brindarnos. Las leguminosas del desierto están siendo cada vez más estudiadas como posibles fuentes de aislados proteicos, aditivos alimentarios, bioactivos y medicamentos. Es importante mejorar los procesos de obtención y,

en el caso de usos medicinales, realizar ensayos con modelos animales, y posteriormente con humanos, para comprobar la efectividad de los compuestos *in vivo*. También, garantizar el uso justo y equitativo de estos recursos (Kumar *et al.*, 2021).

Los carbohidratos solubles, en particular los exudados de la goma de mezquite, tienen gran potencial para sustituir o complementar a la goma arábica, que hoy en día se utiliza en la industrias alimentaria y farmacéutica, y que se estudia para aplicaciones nanotecnológicas. La similitud entre las propiedades de la goma arábica y la goma de exudado de mezquite abre un campo para las posibilidades de uso de la última, siempre y cuando se desarrollen procesos de obtención más eficientes que los actuales aplicados en San Luis Potosí y Sonora. Toda esta potencialidad de las leguminosas del desierto sólo será posible si se planea un aprovechamiento sostenible y sustentable de nuestros desiertos y si se cuenta con la protección necesaria para sus recursos.

CONCLUSIONES

Las leguminosas de los desiertos chihuahuense y sonoreense son un tesoro viviente que permitieron la supervivencia de culturas originarias importantes, las cuales aprendieron a utilizarlas de manera sustentable como fuente de alimento, medicina, refugio, forraje y combustible. Investigaciones posteriores demuestran el valor nutricional y la funcionalidad tecnológica de sus proteínas, la bioactividad de sus metabolitos secundarios y el potencial de sus exudados para complementar o sustituir a otras gomas que en la actualidad se utilizan en las industrias alimentaria y farmacéutica. Para poder aprovechar estos potenciales, se requiere complementar estudios científicos y desarrollar procesos sostenibles y sustentables que preserven a las especies de leguminosas actualmente utilizadas y que permitan la utilización de otras especies, sin poner en riesgo su existencia. Esto puede lograrse mediante el establecimiento de políticas públicas claras y planes de preservación de la biodiversidad efectivos, que promuevan la vinculación de los diferentes actores (pobladores locales, productores, científicos, instancias gubernamentales, etc.) involucrados en el aprovechamiento y la conservación de este recurso.

REFERENCIAS

- ALSHARIF, W., Saad, M. M., y Hirt, H. (2020). "Desert microbes for boosting sustainable agriculture in extreme environments", *Frontiers in Microbiology*, 11, 1-18.
- ARENAS-NAVARRO, M., Téllez-Valdés, O., López-Segoviano, G., Murguía-Romero, M., y Tello, J. S. (2020). "Environmental correlates of Leguminosae species richness in Mexico: quantifying the contributions of energy and environmental seasonality", *Biotropica*, 52(1), 70-80.
- AVILÉS-PERAZA, G. (2016). "Problemas de familia: ¿hacia dónde se dirige la clasificación de *Leguminosae*?", *Desde el Herbario CICY*, 8, 35-39
- AZANI, N., Babineau, M., Bailey, C. D., Banks, H., Barbosa, A., Barbosa Pinto, R., Boatwright, J., Borges, L., Brown, G., Bruneau, A., Candido, E., Cardoso, D., Chung, K-F., Clark, R., Conceção, A., Crisp, M., Cubas, P., Delgado-Salinas, A., y Dexter, K. (2017). "A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny", *Taxon*, 66, 44-77.
- BARAK, S., y Mudgil, D. (2014). "Locust bean gum: processing, properties and food applications—A review", *International Journal of Biological Macromolecules*, 66, 74-80.
- BILDERBACK, A. H., Torres, A. J., Vega, M., & Ball, B. A. (2021). "The structural and nutrient chemistry during early-stage decomposition and desiccation of cacti in the Sonoran Desert". *Journal of Arid Environments*, 195, 104636.
- BLANCO-CONTRERAS, E. (2019). "Huerta de mezquite. Modelo agroecológico forestal para la sostenibilidad en el desierto lagunero del norte de México", *LEISA. Revista de Agroecología*, 39(4), 19-21.
- BOUKID, F. (2021). "Chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein as a prospective plant-based ingredient: a review", *International Journal of Food Science & Technology*, 56(11), 5435-5444.
- BRADLEY, C. M., y Colodner, D. (2020). "The Sonoran Desert", en M. I. Goldstein y D. A. DellaSala (eds.), *Encyclopedia of the World's Biomes*. Oxford: Elsevier, 110-125.
- BRIGGS, M. K., Lozano-Cavazos, E. A., Mills Poulos, H., Ochoa-Espinoza, J., y Rodríguez-Pineda, J. A. (2020). "The Chihuahuan

- Desert: a binational conservation response to protect a global treasure”, en M. I. Goldstein y D. A. DellaSala (eds.), *Encyclopedia of the World's Biomes*. Oxford: Elsevier, 126-138.
- BYE BOETTLER, R. (2004). “Plantas vasculares de la Sierra Tarahumara. Listado florístico, etnobotánico e histórico”. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Informe final SNIB-Conabio, proyecto No. X006. México.
- CAMAZINE, S., y Bye, R. A. (1980). “A study of the medical ethnobotany of the Zuni Indians of New Mexico”, *Journal of Ethnopharmacology*, 2(4), 365-388.
- CARABIAS, J., Arriaga, V., y Cervantes-Gutiérrez, V. (2007). “Las políticas públicas de la restauración ambiental en México: limitantes, avances, rezagos y retos”, *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 80, 85-100.
- CARRILLO-GARCÍA, Á., de La Luz, J.-L. L., Bashan, Y., y Bethlenfalvay, G. J. (1999). “Nurse plants, mycorrhizae, and plant establishment in a disturbed area of the Sonoran Desert”, *Restoration Ecology*, 7(4), 321-335.
- CATTANEO, F., Costamagna, M. S., Zampini, I. C., Sayago, J., Alberto, M. R., Chamorro, V., Pazos, A., Thomas-Valdés, S., Schmeda-Hirschmann, G., e Isla, M. I. (2016). “Flour from *Prosopis alba* cotyledons: a natural source of nutrient and bioactive phytochemicals”, *Food Chemistry*, 208, 89-96.
- CATTANEO, F., Sayago, J. E., Alberto, M. R., Zampini, I. C., Ordoñez, R. M., Chamorro, V., Pasos, A., e Isla, M. I. (2014). “Anti-inflammatory and antioxidant activities, functional properties and mutagenicity studies of protein and protein hydrolysate obtained from *Prosopis alba* seed flour”, *Food Chemistry*, 161, 391-399.
- CECCON, E., Barrera-Cataño, J. I., Aronson, J., y Martínez-Garza, C. (2015). “The socioecological complexity of ecological restoration in Mexico”, *Restoration Ecology*, 23(4), 331-336.
- CERVANTES-RAMÍREZ, M. (2005). “Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México”. Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina. (3388-3407).

- CONABIO. “Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México y Plan de Acción 2016-2030.” (2016). <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/enbiomex/ejes-estrategicos>
- CONAFORT / SEMARNAT (2009). “Estudio regional forestal: Umafor-Río Concepción, clave 2609. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/download.aspx?articulo=3556>.
- CRUZ-RUBIO, J. M., Loeppert, R., Viernstein, H., y Praznik, W. (2018). “Trends in the use of plant non-starch polysaccharides within food, dietary supplements, and pharmaceuticals: beneficial effects on regulation and wellbeing of the intestinal tract”, *Scientia Pharmaceutica*, 86, 49.
- CURTIN, L. S. M. (1984). *By the Prophet of the Earth: ethnobotany of the Pima*. Tucson: University of Arizona Press.
- DELGADO-SALINAS, A., Torres-Colín, L., Luna-Cavazos, M., y Bye, R. (2021). Diversity of useful Mexican legumes: Analyses of herbarium specimen records. *Diversity*, 13(6), 267.
- DIMMITT, M. A. (2015). “Biomes and communities of the Sonoran Desert region”, en M. A. Dimmitt, P. W. Comus y L. M. Brewer (eds.), *A natural history of the Sonoran Desert*. Tucson, Arizona: Arizona-Sonora Desert Museum Press / University of California Press, 5-19.
- DINERSTEIN, E., Olson, D., Atchley, J., Loucks, C., Contreras-Balderas, S., Abell, R., Iñigo, E., Enkerlin, E., Williams, C., y Castilleja, G. (2001). *Ecoregion-based conservation in the Chihuahuan Desert: a biological assessment*. Washington, D.C.: World Wildlife Fund.
- DOMÍNGUEZ, C., Bojórquez, L., Boege, K., Fornoni, J., Gómez, P., Valiente, A., y Orozco-Segovia, A. (2009). *Sinergias entre el cambio climático y las especies exóticas invasoras*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático / Instituto de Ecología.
- DOYLE, J. J., y Luckow, M. A. (2003). “The rest of the iceberg. Legume diversity and evolution in a phylogenetic context”, *Plant Physiology*, 131(3), 900-910.
- ELMORE, F. H. (1944). “Ethnobotany of the Navajo”, *Monographs of the School of American Research* 9(15), 96-117).
- ESTRADA-CASTILLÓN, E., Garza-López, M., Villarreal-Quintanilla, J. Á., Salinas-Rodríguez, M. M., Soto-Mata, B. E., González-Rodríguez,

- H., González-Uribe, D. U., Cantú-Silva, I., Carrillo-Parra, A., y Cantú-Ayala, C. (2014). "Ethnobotany in Rayones, Nuevo León, México", *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10, 62.
- FELGER, R. (2020). "Herbario de la Universidad de Sonora". <http://herbario.uson.mx/>.
- FERRUSQUÍA-VILAFRANCA, I., González-Guzmán, L., y Cartron, J. (2005). "Northern Mexico's landscape, part I: The physical setting and constraints on modeling biotic evolution", en *Biodiversity, ecosystems, and conservation in Northern Mexico*. Nueva York, Oxford University Press, 11-38.
- FRITZ, G. J. (1999). "At the desert's green edge: an ethnobotany of the Gila River Pima", *American Anthropologist*, 101(2), 469-470.
- GARCÍA-ANDRADE, M., González-Laredo, R. F., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Rosales-Castro, M., y Medina-Torres, L. (2013). "Mesquite leaves (*Prosopis laevigata*), a natural resource with antioxidant capacity and cardioprotection potential", *Industrial Crops and Products*, 44, 336-342.
- GARCILLÁN, P. P., y Ezcurra, E. (2003a). "Biogeographic regions and β -diversity of woody dryland legumes in the Baja California Peninsula", *Journal of Vegetation Science*, 14(6), 859-868.
- GARCILLÁN, P. P., Ezcurra, E., y Riemann, H. (2003b). "Distribution and species richness of woody dryland legumes in Baja California, Mexico", *Journal of Vegetation Science*, 14(4), 475-486.
- GAUTAM, R., Singh, S. K., & Sharma, V. (2015). "Suppression of soil-borne root pathogens of arid legumes by *Sinorhizobium saheli*", *SAARC Journal of Agriculture*, 13(1), 63-74.
- GEI, M., Rozendaal, D. M. A., Poorter, L., Bongers, F., Sprent, J. I., Garner, M. D., Powers, J. S. (2018). "Legume abundance along successional and rainfall gradients in Neotropical forests", *Nature Ecology & Evolution*, 2(7), 1104-1111.
- GOETTSCH, B., y Hernández, H. M. (2006). "Beta diversity and similarity among cactus assemblages in the Chihuahuan Desert", *Journal of Arid Environments*, 65(4), 513-528.
- GONZÁLEZ-BARRÓN, U., Dijkshoorn, R., Maloncy, M., Finimundy, T., Calhella, R. C., Pereira, C., Stojković, D., Soković, M., Ferreira, I. C. F. R., Barros, L., y Cadavez, V. (2020). "Nutritive and

- bioactive properties of mesquite (*Prosopis pallida*) flour and its technological performance in breadmaking”, *Foods*, 9, 597.
- GOYCOOLEA, F. M., de la Barca, A. M. C., Hernández, G., Valenzuela, J. R., y Balderrama, J. R. (2000). “Immunochemical, structural and functional properties of mesquite gum compared with gum Arabic”, en E. A. Nothnagel, A. Bacic, y A. E. Clarke (eds.), *Cell and developmental biology of Arabinogalactan-proteins*. Boston, MA: Springer US, 263-276.
- GRANADOS-SÁNCHEZ, D., Sánchez-González, A., Granados Victorino, R. L., y Borja de la Rosa, A. (2011). “Ecología de la vegetación del desierto chihuahuense”, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17, 111-130.
- GUILLO, F., y Champ, M. M. J. (2007). “Carbohydrate fractions of legumes: uses in human nutrition and potential for health”, *British Journal of Nutrition*, 88(S3), 293-306.
- HAFNER, D., y Riddle, B. (2011). “Boundaries and barriers of North American warm deserts: an evolutionary perspective”. In P. Upchurch, McGowan, A.J., Slater, C.S.C. (Ed.), *Palaeogeography and palaeobiogeography: biodiversity in space and time* (75-114). Boca Raton, Florida: CRC press.
- HARRIS, P. J., y Smith, B. G. (2006). “Plant cell walls and cell-wall polysaccharides: structures, properties and uses in food products”, *International Journal of Food Science & Technology*, 41(s2), 129-143.
- HALFFTER, G. (2011). “Reservas de la biosfera: problemas y oportunidades en México”, *Acta Zoológica Mexicana*, 27(1), 177-189.
- HASTINGS, R. B. (1990). “Medicinal legumes of Mexico: Fabaceae, Papilionoideae, part one”. *Economic Botany*, 44(3), 336-348.
- HATFIELD, G. 2004. “Wounds”. In: Hatfield G, ed. *Encyclopedia of folk medicine: old world and new world traditions*. Santa Barbara (CA): ABC-CLIO; 2004. p 376-378.
- HERTZLER, S. R., Lieblein-Boff, J. C., Weiler, M., y Allgeier, C. (2020). “Plant proteins: assessing their nutritional quality and effects on health and physical function”, *Nutrients*, 12(12), 3704.
- ISAH, T. (2019). “Stress and defense responses in plant secondary metabolites production”, *Biological Research*, 52, 39.

- JOHNSON, M. B. (2006). "Legumes of the Texas Rio Grande Region", *Aridus*, 18(1) 1-6.
- KAJITA, T., Ohashi, H., Tateishi, Y., Bailey, C. D., y Doyle, J. (2009). "rbcL and Legume Phylogeny, with particular reference to *Phaseoleae*, *Millettieae*, and allies", *Systematic Botany*, 26, 515-536.
- KU, Y. S., Contador, C. A., Ng, M. S., Yu, J., Chung, G., y Lam, H. M. (2020). "The effects of domestication on secondary metabolite composition in Legumes", *Frontiers in Genetics*, 11, 581357.
- KUMAR, A., Kumar, S., Komal, Ramchiary, N., y Singh, P. (2021). "Role of traditional ethnobotanical knowledge and indigenous communities in achieving sustainable development goals", *Sustainability*, 13(6), 3062.
- LACROIX, K. E. M., Tapia, E., y Springer, A. (2017). "Environmental flows in the desert rivers of the United States and Mexico: synthesis of available data and gap analysis", *Journal of Arid Environments*, 140, 67-78.
- LAGARDA-DIAZ, I., Robles-Burgueño, M. R., Guzmán-Partida, A. M., Geiser, D., Winzerling, J., y Vazquez-Moreno, L. (2012). "Binding of PF2 lectin from *Olneya tesota* to gut proteins of *Zabrotes subfasciatus* larvae associated with the insecticidal mechanism", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(9), 2398-2402.
- LENG, P., Zhang, Z., Pan, G., y Zhao, M. (2011). "Applications and development trends in biopesticides". *African Journal of Biotechnology*, 10, 19864-19873.
- LÓPEZ-FRANCO, Y. L., de la Barca, A. M. C., Valdez, M. A., Peter, M. G., Rinaudo, M., Chambat, G., y Goycoolea, F. M. (2008). "Structural characterization of mesquite (*Prosopis velutina*) gum and its fractions", *Macromolecular Bioscience*, 8(8), 749-757.
- LÓPEZ-GARCÍA, B. (2017). "Arbustos: una forma de vida en las zonas áridas y semiáridas de México", tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Chapingo.
- MAMONE, G., Sciammaro, L., De Caro, S., Di Stasio, L., Siano, F., Pica-riello, G., y Puppo, M. C. (2019). "Comparative analysis of protein composition and digestibility of *Ceratonia siliqua* L. and *Prosopis* sseed germ flour", *Food Research International*, 120, 188-195.

- MAYS, L. W. (2007). "Water sustainability of ancient civilizations in Mesoamerica and the American Southwest", *Water Supply*, 7(1), 229-236.
- MERRILL, W. (2009). "People of the desert and sea: ethnobotany of the Seri indians", *American Ethnologist*, 15, 404-405.
- MORENO, M., de-Bashan, L. E., Hernandez, J.-P., Lopez, B. R., y Bashan, Y. (2017). "Success of long-term restoration of degraded arid land using native trees planted 11 years earlier", *Plant and Soil*, 421(1), 83-92.
- MORENO-SALAZAR, S. F., Enríquez Verdugo, A., Cuamea López, C., Bolado Martínez, E., Medrano Candelas, T., y Robles-Zepeda, R. E. (2008). "Activity of medicinal plants, used by native populations from Sonora, Mexico, against enteropathogenic bacteria", *Pharmaceutical Biology*, 46, 10-11, 732-737.
- MUDGIL, D., y Barak, S. (2020). "Mesquite gum (*Prosopis* gum): structure, properties & applications - A review", *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 1094-1102.
- NABHAN, G. P. (2015). "Welcome to the Sonoran Desert", en M. A. Dimmitt, P. W. Comus, y L. M. Brewer (eds.), *A natural history of the Sonoran Desert*. Tucson, Arizona: Arizona-Sonora Desert Museum Press / University of California Press, 1-2.
- NABHAN, G. P. (1985). "Native crop diversity in Aridoamerica: conservation of regional gene pools", *Economic Botany*, 39(4), 387-399.
- NELSON, D. L., y Cox, M. M. (2017). *Lehninger principles of biochemistry*. W.H. Freeman.
- NINGTHOUJAM, S. S., Talukdar, A. D., Potsangbam, K. S., y Choudhury, M. D. (2012). "Challenges in developing medicinal plant databases for sharing ethnopharmacological knowledge". *Journal of Ethnopharmacology*, 141(1), 9-32.
- OLMEDO-JUÁREZ, A., Briones-Robles, T. I., Zaragoza-Bastida, A., Zamilpa, A., Ojeda-Ramírez, D., Mendoza de Gives, P., Olivares-Pérez, J., y Rivero-Pérez, N. (2019). "Antibacterial activity of compounds isolated from *Caesalpinia coriaria* (Jacq) Willd against important bacteria in public health", *Microbial Pathogenesis*, 136, 136, 103660.

- ORTEGA-NIEBLAS, M. (1993). "Estudio de algunas semillas de leguminosas del desierto de Sonora. Factores anti-nutricionales y calidad de sus proteínas y aceites", tesis de maestría, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Hermosillo, México.
- ORTEGA-NIEBLAS, M., Vázquez-Moreno, L., y Robles-Burgueño, M. R. (1996). "Protein quality and antinutritional factors of wild legume seeds from the Sonoran Desert", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(10), 3130-3132.
- PATEL, S., y Goyal, A. (2015). "Applications of natural polymer gum Arabic: A Review". *International Journal of Food Properties*, 18(5), 986-998.
- PATHAK, R., Singh, S. K., y Gehlot, P. (2017). "Diversity, nitrogen fixation, and biotechnology of *Rhizobia* from arid zone plants", en A. P. Hansen, D. K. Choudhary, P. K. Agrawal, y A. Varma (eds.), *Rhizobium biology and biotechnology*. Cham: Springer International Publishing, 61-81.
- RIDDLE, B. R., Hafner, D. J., Alexander, L. F., y Jaeger, J. R. (2000). "Cryptic vicariance in the historical assembly of a Baja California Peninsular Desert biota". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(26), 14438-14443.
- RÍOS-SAUCEDO, J. C., Trucíos, R., Valenzuela-Núñez, L. M., y Sosa, G. (2011). *Importancia de las poblaciones de mezquite en el nortecentro de México*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (Inifap).
- RODRÍGUEZ-SAUCEDA, E., Martínez, G., Ramírez-Valverde, B., Ruiz, R., Hermida, M., Torres, S., y Ruiz, H. (2014). "Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) en México", *Ra Ximhai*, 10(3), 173-193.
- ROSAS-DUARTE, I. (2015). "Los saberes etnomédicos de las plantas del pueblo seri comcáac. Punta Chueca y Desemboque, Sonora", tesis de licenciatura, Escuela Nacional de Antropología e Historia.
- SCHMIDT, R. H. Jr. (1979) "A climatic delineation of the 'real' Chihuahuan Desert", *Journal of Arid Environments*, 2, 243-250.
- SEMARNAT (2010). "Norma Oficial Mexicana NOM-059. Protección ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión,

- exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo”, *Diario Oficial de la Federación*, 30 de noviembre.
- SHAFFER, C. V., Cai, S., Peng, J., Robles, A. J., Hartley, R. M., Powell, D. R., Du, L., Cichewicz, R.L., y Mooberry, S. L. (2016). “Texas native plants yield compounds with cytotoxic activities against prostate cancer cells”, *Journal of Natural Products*, 79(3), 531-540.
- SILVA, L. N., Rigo, G. V., Silva, D. B., Carollo, C. A., Trentin, D. S., Silva, M. V., Tasca, T., y Macedo, A. J. (2020). “Hydrolysable tannins from *Poincianella (Caesalpinia) microphylla* fruits: metabolite profiling and anti-*Trichomonas vaginalis* activity”, *Food Research International*, 134, 109236.
- SOLIVERES, S., Eldridge, D. J., Hemmings, F., y Maestre, F. T. (2012). “Nurse plant effects on plant species richness in drylands: the role of grazing, rainfall and species specificity”, *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 14(6), 402-410.
- SOTELO, A. (1996). “The nutritive value of wild Mexican legumes with a potential for nutritional use”, en E. Nwokolo y J. Smartt (eds.), *Food and feed from legumes and oilseeds*. Boston, MA: Springer US, 33-48.
- SUZÁN, H., Nabhan, G. P., y Patten, D. T. (1996). “The importance of *Olneya tesota* as a nurse plant in the Sonoran Desert”, *Journal of Vegetation Science*, 7(5), 635-644.
- TAYLOR, M. J. (2008). “The mesquite economy in the Mexican-American borderlands”, *Journal of Latin American Geography*, 7(1), 133-149.
- TIAN, C. F., Zhou, Y. J., Zhang, Y. M., Li, Q. Q., Zhang, Y. Z., Li, D. F., Wang, S., Wang, J., Gilbert, B., Li, Y. R., y Chen, W. X. (2012). “Comparative genomics of rhizobia nodulating soybean suggests extensive recruitment of lineage-specific genes in adaptations”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(22), 8629.
- TONG, X.-L., Lian, F.-M., Zhou, Q., Xu, L.-P., Ji, H.-Y., Xu, G.-C., . . . , y Chang, B. (2013). “A prospective multicenter clinical trial of Chinese herbal formula JZQG (Jiangzhuoqinggan) for hypertension”, *American Journal of Chinese Medicine*, 41(01), 33-42.
- TORRE, V. H. C. de la, y Sandoval, S. (2014). “Cambios territoriales, producción de carbón vegetal y situación social de los ejidos de la franja costera de Hermosillo, Sonora: una discusión acerca de la

- importancia del capital social”, en P. Wong, L. Núñez y V. Salazar, *Desarrollo económico territorial: visión y experiencias desde la región norte de México*. Hermosillo, México: CIAD, 269-308.
- VALLI, S., Gokulshankar, S., Mohanty, B. K., Ranjith, M. S., Ashutosh, S. R., y Remya, V. (2014). “Anticryptococcal activity of alkaloid rich fraction of leaves of *Prosopis juliflora* - A future promising supplementary therapy for cryptococcosis and cryptococcal meningitis?”, *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 6(2), 491-495.
- VÁZQUEZ-MORENO, L., Ortega-Nieblas, M., Robles-Burgueño, M. R., y Ramos Clamont, G. (2000). “Purification of complex carbohydrate specific lectins from *Olneya tesota* seeds using tandem affinity chromatography”, *International Journal of Bio-Chromatography*, 5(2), 83-90.
- VILLARREAL-QUINTANILLA, J. A., Bartolomé-Hernández, J. A., Estrada-Castillón, E., Ramírez-Rodríguez, H., y Martínez-Amador, S. J. (2017). “El elemento endémico de la flora vascular del Desierto Chihuahuense”, *Acta Botánica Mexicana*, 118, 65-96.
- WAIZEL-BUCAY, J., y Martínez, R. I. M. (2011). “Algunas plantas usadas en México en padecimientos periodontales”, *Revista de la Asociación Dental Mexicana*, 68(2), 73-88.
- WEBB, R. H., y Turner, R. M. (2020). “Biodiversity of perennial vegetation in the desert regions of Baja California and Baja California Sur, Mexico”, en M. I. Goldstein y D. A. DellaSala (eds.), *Encyclopedia of the world's biomes*. Oxford: Elsevier, 139-151.
- WINCK, M. (2013). “Evolution of secondary metabolites in legumes (*Fabaceae*)”, *South African Journal of Botany*, 89, 164-175.
- YAHARA, T., Javadi, F., Onoda, Y., de Queiroz, L. P., Faith, D. P., Prado, D. E., y Nkonki, T. (2013). “Global legume diversity assessment: concepts, key indicators, and strategies”, *Taxon*, 62(2), 249-266.
- YETMAN, D., y Van Devender, T. R. (2002). *Mayo ethnobotany land, history, and traditional knowledge in Northwest Mexico*. University of California Press.
- ZAKHIA, F., Jeder, H., Willems, A., Gillis, M., Dreyfus, B., y de Lajudie, P. (2006). “Diverse bacteria associated with root nodules of spontaneous legumes in Tunisia and first report for nifH-like

Gene within the Genera *Microbacterium* and *Starkeya*", *Microbial Ecology*, 51(3), 375-393.

ZAVALA-HURTADO, J. A., y Jiménez, M. (2020). "Diversity and uniqueness at its best: vegetation of the Chihuahuan Desert", en M. C. Mandujano, I. Pisanty, y L. E. Eguiarte (eds.), *Plant diversity and ecology in the Chihuahuan Desert: emphasis on the Cuatro Ciénegas Basin*. Cham: Springer International Publishing, 1-17.

CAPÍTULO 4 LOS AGAVES SU IMPORTANCIA A TRAVÉS DEL TIEMPO

EUGENIA LUGO CERVANTES¹
MONTSERRAT ALCÁZAR VALLE²

RESUMEN

Previo a la introducción del maíz como cultivo, el agave era la principal fuente de carbohidrato en las regiones que abarcan el noreste y noroeste de México, y el sureste de Estados Unidos. La historia en la diversificación del cultivo de agave abarca desde su uso como alimento hace aproximadamente 11 000 años antes de nuestra era, posteriormente como bebida fermentada y destilada, hasta el empleo en nuestros días como materia prima para la producción de bebidas alcohólicas (e.g. tequila, mezcal, sotol y bacanora), la obtención de fruto-oligosacáridos (fructanos, agavinas) que actúan como prebióticos y fibra dietética, que ayuda a la función intestinal, la digestión y a la estimulación del sistema inmune, para la prevención de enfermedades crónicas como la obesidad y diabetes. Sin embargo, en las últimas décadas se ha impulsado el estudio del uso de algunas especies de *Agave* como posible materia prima para extracción de compuestos bioactivos (e.g. triterpenos, esteroides, taninos, cumarinas volátiles, flavonoides, alcaloides y saponinas esteroideas), debido a que dichos compuestos presentan actividades biológicas

¹ Tecnología Alimentaria, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Autor de correspondencia: elugo@ciatej.mx.

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

que pueden ser beneficiosa para la salud humana. Asimismo, se ha estudiado su empleo en la elaboración de biocombustibles y para la biorremediación de suelos. Por lo anterior, el cultivo del agave ha demostrado ser un recurso renovable con múltiples aplicaciones a lo largo del tiempo.

PALABRAS CLAVE: agave, alimento, bebida, prebiótico, compuestos bioactivos, potencial biotecnológico.

INTRODUCCIÓN

El proceso de domesticación en plantas es influido principalmente por la cultura y las necesidades humanas, siendo la región de Mesoamérica un centro importante de domesticación de plantas, como maíz, frijol, calabaza, tomates, algodón, cacao, pimientos, variedad de árboles frutales, cactus y agaves (Figueredo *et al.*, 2014).

Los agaves son plantas perennes, con hojas dispuestas en espiral, y por lo general son suculentas, fibrosas, con la base dilatada y carnosa; su forma varía de linear a lanceolada u ovalada, con espinas (figura 1), y regularmente termina con una espina en la punta. Son plantas que se reproducen de manera sexual mediante la polinización, y asexual produciendo clones denominados hijuelos, en diferentes partes de la roseta o la inflorescencia (García-Mendoza *et al.*, 2004).

FIGURA 1



Algunas especies de *Agave*, Jardín Etnobotánico del estado de Oaxaca, México.
Fuente: Eugenia Lugo Cervantes & Montserrat Alcázar Valle.

El género *Agave* L. fue un cultivo de recursos muy importante para las culturas mesoamericanas; algunos nombres con los cuales se le denominaba a esta planta fueron *métl*, en náhuatl, o *huadá*, en otomí (Scheinvar-Gottdiener, 2017); se utilizó principalmente como alimento, en la construcción, en la elaboración de prendas de vestir y de bebidas fermentadas, y con fines medicinales y ceremoniales (Torres-García *et al.*, 2019).

En la época de la conquista y colonización del continente americano, algunos historiadores de la época quedaban maravillados por las propiedades y las capacidades de los agaves o magueyes, y plasmaron sus impresiones en diferentes escritos (Scheinvar-Gottdiener, 2017). Algunos de los agaves que se encuentran ampliamente documentados y estudiados son las especies *Agave salmiana* Otto ex Salm Dyck, *A. salmiana* var. *ferox*, *A. salmiana* ssp. *crassispina*, *A. fourcroyde* Lem, *A. angustifolia* Haw, *A. americana* var. *marginata* Trel, *A. tequilana* Weber var. azul, *A. cupreata*, *A. sisalana*, *A. lechuguilla*, *A. karwinskii*, *A. macroacantha* y *A. maximiliana*. Sin embargo, el estudio de este cultivo sigue estando vigente y se han documentado nuevas especies de agave, como es el caso del *A. sanpedroensis* en el sureste de Arizona, que fue cultivado y domesticado por los hohokam, una comunidad nativoamericana que habitó la zona entre los años 800 y 1450 de nuestra era (Hodgson *et al.*, 2018; Torres-García *et al.*, 2019).

Fue tal el impacto de la introducción del proceso de destilación en la elaboración de bebidas alcohólicas a partir del agave, que es en nuestros días la principal actividad económica en la que se utiliza esta planta como materia prima (Pérez-Zavala *et al.*, 2020). No obstante, al ser el agave una planta tan resistente a condiciones climáticas, sus usos se pueden expandir a múltiples aplicaciones. Debido a esto, se han centrado diversos estudios biotecnológicos en el uso potencial de los agaves, principalmente en biocombustibles, bebidas, alimentos y fibras, buscando siempre la sustentabilidad y la conservación del medio ambiente (Nava-Cruz *et al.*, 2014).

DISTRIBUCIÓN DE LOS AGAVES EN EL PAÍS

La familia *Asparagaceae* alberga nueve géneros (*Agave*, *Beschorneria*, *Furcraea*, *Hesperaloe*, *Hesperoyucca*, *Manfreda*, *Polianthes*, *Prochnyanthes*

y *Yucca*), con 330 especies. El género *Agave* es el más grande de la familia *Asparagaceae*. La palabra *agave* proviene del griego *agavos*, que significa ‘notable’ o ‘admirable’ (Gschaedler *et al.*, 2015). Este término fue propuesto por Carl Linnaeus en 1753 (Reyes-Samilpa *et al.*, 2020). Aunque ya existían diversas palabras de origen indígena para referirse a este género, una de las principales, *metl*, de origen náhuatl, asociaba a la planta a la diosa Mayahuel, “que proveería del agua sagrada en medio de la árida meseta” (Pérez-Zavala *et al.*, 2020).

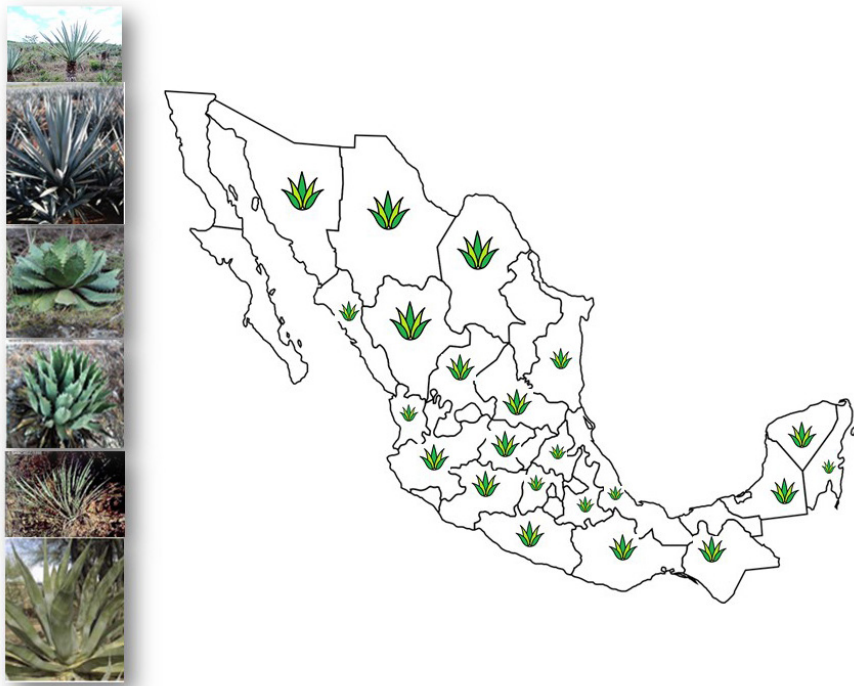
El agave es endémico de América; su distribución abarca del sur de Estados Unidos hasta Colombia, Venezuela e incluye todas las islas del Caribe, siendo los países con mayor número de especies México, Estados Unidos, Cuba y Guatemala. Además de América, su uso y cultivo se ha extendido hacia África, Asia y Europa (Ahumada-Santos *et al.*, 2013; Colunga-García *et al.*, 2017).

El género *Agave* presenta el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, por sus siglas en inglés), muy común en plantas suculentas que habitan en regiones áridas y secas en donde el agua es el factor limitante. Este mecanismo adaptativo consiste en incorporar CO₂ durante la noche con las estomas abiertas; este CO₂ es almacenado en la vacuola en forma de ácido málico, con lo que se evita el riesgo de perder agua por evapotranspiración. Durante el día, cuando la transpiración es mayor por efecto de la luz, las estomas se cierran para impedir la pérdida de agua; el ácido málico es descarboxilado, de donde se obtiene carbono, que será utilizado por la planta para producir carbohidratos. Con este metabolismo se obtiene gran cantidad de carbono y una pérdida mínima de agua en la planta (García-Mendoza, 2007). El metabolismo particular de los agaves, sus características fisiológicas y morfológicas les permiten sobrevivir en condiciones extremas.

Los agaves comprenden alrededor de 400 especies, siendo el territorio mexicano el que tiene la más alta riqueza (Nava-Cruz *et al.*, 2014; Sidana *et al.*, Torres-García *et al.*, 2019). Por lo anterior, podemos encontrar que el género *Agave* es abundante en las regiones montañosas del centro de México, en la Sierra Madre Occidental y el Altiplano Mexicano. Los estados en donde se concentra la mayor diversidad de especies son Oaxaca, Puebla, Sonora, Querétaro, Durango y Sinaloa (Ahumada-Santos *et al.*, 2013; López-Romero *et al.*, 2017). Algunas especies de *Agave* crecen en un área

muy específica, mientras que otros están ampliamente distribuidos (figura 2). Por ejemplo, los agaves “mezcaleros” se encuentran en la mayoría de los estados mexicanos, excepto en Baja California Norte y Sur, y Tabasco.

FIGURA 2



Distribución de los agaves “mezcaleros” en México

Fuente: Conabio (<http://bioteca.conabio.gob.mx/janium/Documents/5324.pdf>).

De acuerdo con las estadísticas del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2017), en México se tiene registro de una superficie sembrada de agave (tequilero, mezcalero, bacanora y agave sin clasificar) de 105 690 hectáreas, de las cuales 13 924 hectáreas han sido cosechadas, con una producción de 1 145 306 toneladas de agave colectado y un rendimiento de 82 T/ha (SIAP, 2017). El estado de Jalisco se destaca con la mayor superficie sembrada, cosecha, producción y rendimiento obtenidos para 2017 (cuadro 1).

CUADRO 1
ESTADOS, SUPERFICIE SEMBRADA Y COSECHADA, PRODUCCIÓN
Y RENDIMIENTO DE *AGAVE* EN MÉXICO EN 2017

Estado	Sup. sembrada [ha]	Sup. cosechada [ha]	Producción [T]	Rendimiento [T/ha]
Baja California Sur	3	0	0	0
Colima	1	0	0	0
Durango	353	0	0	0
Guanajuato	13 439	1 448	112 412	77.63
Guerrero	1 344	66	2 031	30.63
Jalisco	65 784	9 830	890 830	90.62
México	176	80	5 131	64.13
Michoacán	4 259	337	27 629	81.98
Morelos	63	0	0	0
Nayarit	6 294	526	16 570	31.53
Oaxaca	8 078	1 218	74 297	60.99
Puebla	196	0	0	0
Sinaloa	1 407	0	0	0
Sonora	18	0	0	0
Tamaulipas	2 787	418	16 407	39.20
Veracruz	216	0	0	0
Zacatecas	1 273	0	0	0
Total	105 690	13 924	1 145 306	82.25

Fuente: SIAP (2017).

Las poblaciones de agave en cada región son importantes debido a que son consideradas como parte de sistemas agroforestales que permiten la conservación y restauración de múltiples especies útiles de plantas tanto domesticas como silvestres; algunos análisis basados en marcadores genéticos y fenotipos han revelado diferencias entre los agaves silvestres y los domesticados, relacionadas con la conformación de los metabolitos secundarios (Cabrera-Toledo *et al.*, 2020).

QUÍMICA DE LOS AGAVES

El conjunto de cambios químicos y biológicos que se llevan a cabo en las células vivas de un organismo se conoce como metabolismo, en donde se sintetizan sustancias complejas a partir de simples, o se degradan complejas para obtener sustancias simples (Ávalos y Pérez-Urria, 2009).

El metabolismo primario de las plantas cumple una función directa sobre la supervivencia, reproducción y crecimiento de éstas; su ausencia es letal. Se caracteriza por la generación de procesos químicos esenciales, como son fotosíntesis, glicólisis, ciclo del ácido cítrico, síntesis de aminoácidos, transaminación; síntesis de proteínas, enzimas y coenzimas; síntesis de materiales estructurales, reproducción de células, absorción de nutrientes, así como la duplicación del material genético. Los compuestos químicos que participan en los procesos mencionados son los aminoácidos (formación de proteínas), los nucleótidos (generación de ADN y ARN), los azúcares y los lípidos, que se conocen como metabolitos primarios (Ávalos y Pérez-Urria, 2009).

El metabolismo secundario genera una serie de compuestos que no tienen una función directa en los procesos vitales de las plantas; sin embargo, cumplen funciones complementarias para éstas, como son de defensa contra depredadores o patógenos; confieren también cualidades sensoriales y propiedades biológicas; entre éstos se encuentran los flavonoides, los terpenos, los alcaloides y los esteroides. No todos los metabolitos secundarios se encuentran en todas las especies de plantas, algunos son sintetizados de manera abundante y otros de forma restringida, dependiendo de la especie y el estrés ambiental al que esté sometida la planta, pues los metabolitos secundarios son considerados compuestos de defensa (Ávalos y Pérez-Urria, 2009).

La composición química de los agaves es muy compleja y varía de una especie a otra; para fines prácticos de este capítulo, nos centraremos en los metabolitos secundarios más relevantes, como las saponinas, los compuestos fenólicos y los fructanos de agave.

Saponinas

La palabra *saponina* proviene del latín *sapo*, que significa jabón; son metabolitos secundarios que las plantas utilizan como mecanismo de defensa contra insectos, hongos, levaduras o bacterias; comprenden una unidad polar (glucosa, galactosa, xilosa, ramnosa) y una unidad no polar (sapogenina). Normalmente, la cadena de oligosacáridos (unidad polar) se une al C₃ de la sapogenina. En la antigüedad, en diversas culturas alrededor del mundo, muchas plantas con alto contenido de saponinas eran utilizadas para la elaboración de jabones (Figueredo-Urbina *et al.*, 2018; López-Romero *et al.*, 2017). Sin embargo, en la última década se ha documentado que las saponinas presentan diversas actividades biológicas, como antiparasitarias, antivirales, cicatrizantes, antioxidantes, inmunomoduladores, hepatoprotectoras, neuroprotectoras, antimutagénicas, hipolipemiantes e hipocolesterolemias (Carmona *et al.*, 2017).

Existen diferentes clases de saponinas; entre éstas podemos encontrar las triterpénicas (C₃₀), las esteroidales (C₂₇) y las aminoesteroides. En los agaves, las saponinas que predominan son las de tipo esteroidal, las cuales se concentran en las hojas, de las que se pueden clasificar en dos tipos: las de tipo espirostano y las de tipo furostano. De los 150 tipos de saponinas identificados hasta el momento, sólo 45 han sido aislados de las especies de *Agave*, de las cuales se ha reportado que las saponinas esteroidales de tipo espirostano exhiben una mayor actividad antimicrobiana en comparación con las de tipo furostano, siendo la hecogenina una de las principales sapogeninas del tipo espirostano (Alcázar *et al.*, 2017). En cuanto a la actividad antioxidante, se ha observado que ésta se incrementa al aumentar las condiciones de estrés, como en el caso del *A. salmiana* al ser sometido a condiciones de sequía (Puente-Garza *et al.*, 2017a).

Al considerarse una importante fuente de sapogeninas esteroidales, la especie de *A. americana* ha sido la más utilizada para la producción de esteroides. Por lo anterior, las saponinas de agave pueden considerarse una fuente importante de materia prima para la obtención de productos farmacológicos, como corticoides, hormonas o diuréticos. Estudios realizados en *A. salmiana* reportan que el estrés por sequía favorece el aumento del contenido de saponinas (Puente-Garza *et al.*, 2017a); además, se ha observado que la micropropagación dirigida en *A. salmiana*

es una excelente opción para producir mayor contenido de metabolitos secundarios, ya que se pueden controlar las condiciones ambientales en comparación con las especies silvestres (Puentes-Garza *et al.*, 2017b).

La concentración y tipo de saponina puede variar entre especies de agave y tipo de cultivo, ya sea silvestre o cultivado en invernadero (Alcázar *et al.*, 2017; Figueredo-Urbina *et al.*, 2018). Las saponinas y los compuestos fenólicos constituyen entre 0.5 y 4.5% de los metabolitos secundarios en los agaves que han sido identificados (Soto-Castro *et al.*, 2021).

Fenólicos

En la última década los compuestos fenólicos han recibido cada vez más atención debido a sus funciones bioactivas, como actividad antimicrobiana, antiviral y una alta actividad antioxidante. Además, los compuestos fenólicos son determinantes en la calidad sensorial y nutricional de las plantas. En función de su estructura, poseen un anillo aromático enlazado con uno o más grupos hidroxilo; su estructura puede ser desde una simple molécula fenólica hasta un polímero de alto peso molecular (Ignat *et al.*, 2011)

Los compuestos fenólicos se localizan en todos los órganos de la planta; su concentración varía a lo largo del ciclo de vida de la planta. En la célula, la síntesis de los compuestos fenólicos se relaciona con el retículo endoplasmático, donde se glucosidan y son excluidos dentro de vesículas de transporte; éstas los conducen hacia la vacuola, en donde se encuentran en mayor proporción, aproximadamente el 97%, mientras que en la pared celular encontramos un 3% (Renard *et al.*, 2017; Toivonen y Brummell 2008). Los compuestos fenólicos, proteínas, polisacáridos y la enzima polifenoloxidasas (PPO) se localizan en compartimientos diferentes y no interactúan entre sí; sólo cuando la célula se rompe, estos compuestos entran en contacto, y diversas reacciones se llevan a cabo, como oxidación, solubilización, migración y adsorción, que impactan de manera significativa las cualidades organolépticas y nutricionales de la planta (Renard *et al.*, 2017; Toivonen y Brummell, 2008).

La estructura química que poseen los compuestos fenólicos con anillos hidrofóbicos y grupos hidroxilo hidrofílicos; permiten que se

encuentren en forma libre o enlazada a macromoléculas, tales como proteínas, lípidos y polisacáridos, principalmente. La unión entre ellos puede ser por puentes de hidrógeno (entre el grupo hidroxilo y átomos de oxígeno del enlace glucosídico en carbohidratos), por interacciones hidrofóbicas y enlaces covalentes (enlace éster entre ácidos fenólicos y carbohidratos); estas interacciones pueden afectar la bioaccesibilidad y biodisponibilidad (Quirós *et al.*, 2011)

La concentración y el tipo de compuestos fenólicos puede variar de una especie de *Agave* a otra; de seis especies de agave estudiadas, se obtuvo que la concentración de compuestos fenólicos fluctuó entre 2.06 y 12.37 mg eq ácido gálico g⁻¹ PS. Además, los flavonoides más representativos son kaempferol, kaempferol 3-glucosido, miricetina 3-O-ramnosida y quercetina 3-O-arabinosida; estos compuestos bioactivos presentan diferentes actividades antiparasitarias, antioxidantes, antimicrobianas, además de actividades inmunomodulatorias, anticáncer y antiinflamatorias que reducen el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares. Por tanto, la extracción de estos compuestos a partir de algunas especies de agave podría ser una formulación de ingredientes funcionales en la industria alimentaria, o bien para la elaboración de algún fármaco (López-Romero *et al.*, 2017).

Fructanos

Los fructanos son moléculas de polifruktosa en forma ramificada o lineal, con enlaces glicosídicos que pueden ser β 2-1, β 2-6 o una combinación de ambos; los fructanos que se consumen en mayor medida son los que provienen de la achicoria, a la que se le atribuyen varios beneficios a la salud, entre lo que destaca su capacidad prebiótica (Pardilla-Camberos *et al.*, 2018). En el caso de los fructanos de agave, los primeros en ser identificados y estudiados fueron los del tipo inulina en el *Agave tequilana* Weber variedad azul y *Agave americana* (Pardilla-Camberos *et al.*, 2018; Pérez-López *et al.*, 2021). Algunos estudios han explorado el potencial de los fructanos de agave como una fuente de energía renovable o como fibra debido a sus beneficios prebióticos (Pérez-López *et al.*, 2021).

En este último caso, los fructanos de agave han demostrado ser una buena fuente de fibra dietética. Además, pueden contribuir a la reducción del colesterol y glucosa en modelos animales; y recientemente se ha observado la reducción de peso y de la grasa corporal, en especial en el hígado, y de generar saciedad en humanos (Padilla-Camberos *et al.*, 2018).

Los fructanos de agave se acumulan en diversas partes de la planta, como las hojas, raíces e inclusive en el tejido floral, pero principalmente se almacenan en las vacuolas. Existen diferentes tipos de fructanos en el agave; algunos autores han tratado de distinguir entre los tipos de fructanos denominándolos “agavinas” (Pérez-López y Simpson, 2020; Pérez-López *et al.*, 2021).

APLICACIONES RELEVANTES DE LOS AGAVES

Los principales usos de los agaves se relacionan con sus características biológicas más distintivas. Por tanto, las aplicaciones más relevantes se dividen en alimentos, bebidas (sin fermentar, fermentada y destiladas) y fibras. No obstante, se han identificado cerca de 22 categorías de usos con más de 100 especies de *Agave* (Colunga-García *et al.*, 2017).

Alimentos y bebidas

El consumo de bebidas de agave se ha incrementado en los últimos treinta años tanto en el territorio nacional como en el extranjero (Torres-García *et al.*, 2019). Tanto los pedúnculos como las cabezas de los agaves, asadas u horneadas bajo tierra, han sido ampliamente utilizados como alimento desde hace al menos 11 000 años. La elaboración de bebidas alcohólicas es la principal actividad en la que se utilizan las especies de agave, siendo las más producidas el tequila, mezcal y bacanora (López-Romero *et al.*, 2017).

- i. Tequila. De acuerdo con su denominación de origen, esta bebida sólo puede ser producida a partir del *Agave tequilana* Weber variedad azul, que se cultiva principalmente en los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Nayarit y Tamaulipas.

- ii. Mezcal. A diferencia del tequila, el mezcal puede producirse con diferentes especies de *Agave*; cerca de 53 especies, siendo las más utilizadas *A. angustifolia* Haw, *A. asperrina* Jacobi, *A. weberi* Cela, *A. salmiana* Otto y *A. potatorum* Zucc. Los lugares de mayor uso de estas especies de agave para la producción de mezcal son los estados de Guerrero, Zacatecas, San Luis Potosí, Durango, Oaxaca, Guanajuato y Tamaulipas.
- iii. Bacanora. Esta bebida regional se produce en el estado de Sonora, a partir de *Agave angustifolia* Haw.

Fuente de prebióticos y compuestos bioactivos

El consumo de alimentos funcionales se ha incrementado recientemente, con el objetivo principal de mejorar la salud. Uno de los puntos esenciales es tener una microbiota intestinal sana, y el uso de carbohidratos fermentables como fuente de prebióticos ha sido fundamental para conseguir este objetivo. Dentro de estos compuestos, destacan los fructo-oligosacáridos (FOS), oligosacáridos (GOS), el almidón resistente y los fructanos, obtenidos principalmente de la alcachofa de Jerusalén, las dalias y la achicoria. No obstante, la presencia de fructanos complejos en los agaves ha abierto un importante campo de estudio, ya que se han estado consumiendo desde épocas prehispánicas. En este sentido, como se había mencionado antes, los fructanos más estudiados como fuente prebiótica han sido los provenientes de *Agave tequilana*. Sin embargo, algunos estudios han demostrado en modelos animales que los fructanos de *Agave salmiana* poseen efectos similares a los obtenidos con la inulina de achicoria y con los fructanos de *Agave tequilana* (Regalado-Rentería *et al.*, 2020). Resultados similares se obtuvieron al comparar los fructanos de *A. fourcroydes*, que se caracteriza por tener un alto contenido de estos compuestos, al compararlo con prebióticos comerciales, los fructanos de agave mostraron tener una respuesta prebiótica similar o mejor en un modelo animal (García-Curbelo *et al.*, 2015).

También, algunos estudios reportan que los fructanos con un índice de polimerización bajo son los responsables de la mayoría de los efectos benéficos, por lo que representan una poderosa herramienta para

prevenir el aumento de peso, la acumulación de grasa en el hígado y la hiperglicemia. Sin embargo, los fructanos con un índice de polimerización alto o bajo tienen efectos complementarios en desórdenes metabólicos relacionados con la obesidad (Franco-Robles *et al.*, 2018; Márquez-Aguirre *et al.*, 2016). Por último, se ha demostrado en estudios con ratones que las agavinas (cadena de fructanos) pueden prevenir los desórdenes metabólicos asociados con el sobrepeso, debido a que pueden promover la secreción de algunos péptidos involucrados en la regulación del apetito (Huazano-García y López, 2015; Santiago-García y López, 2014).

Además, los extractos de los agaves han mostrado diferentes efectos biológicos, como actividades antimicrobianas, antifúngicas, antioxidantes y antiinflamatorias. Estas actividades son atribuidas a su alto contenido de compuestos bioactivos, de los que destacan las saponinas, los flavonoides, compuestos fenólicos, taninos y fructanos (López-Romero *et al.*, 2017).

Algunos estudios sugieren que la edad es un factor decisivo en el contenido de compuestos bioactivos en el caso de las hojas de *Agave potatorum* Zucc; independientemente de la ubicación de la hoja en la planta y de la distribución de los compuestos fenólicos en ella, se observa una disminución de su concentración a la edad de cuatro años (Soto-Castro *et al.*, 2021).

Textiles

El uso de las fibras del agave en la elaboración de textiles se ha documentado en sitios arqueológicos que datan de los 5 000 años A.C. (Viniestra-González, 2021). Estas fibras conocidas comúnmente como ixtle se obtienen de las hojas de los *Agaves*, como *A. sisalana*, *A. lechuguilla*, *A. salmiana* y *A. mapisaga* (Álvarez-Chávez *et al.*, 2021). Algunas comunidades que en la actualidad elaboran el ixtle de manera artesanal se ubican en el Valle de Mezquital, en el estado de Hidalgo, en México. A partir de las fibras del agave, especialmente de *A. salmiana* y *A. mapisaga*, estas comunidades elaboran productos artesanales como mecapales, morrales, costales y ayates (Reyes-Samilpa *et al.*, 2020).

Es importante destacar que, para este trabajo artesanal de hilado y tejido, su elaboración requiere de un conocimiento integral que abarca

desde el conocimiento de cómo cosechar las especies de *Agave* hasta las oportunidades de mercado donde se puedan vender estas prendas (Reyes-Samilpa *et al.*, 2020). Por otro lado, la especie de *A. lechuguilla* Torr, que es nativa principalmente de los estados de Coahuila, Chihuahua, Durango, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas, ha sido la principal fuente para la extracción de fibra en estas regiones, y constituye una actividad económica sustancial familiar desde hace poco más de setenta años, donde cerca del 93% de la producción se destina a la exportación (Castillo-Quiroz *et al.*, 2013). Debido a la buena calidad de las fibras que se obtienen a partir del agave, se han utilizado para la elaboración de ropa, canastas, estropajos, telas, papel, etc. (Pérez-Zavala *et al.*, 2020).

Potencial uso biotecnológico

Los residuos generados principalmente en las agroindustrias del tequila y mezcal, como las hojas o el bagazo, han dado origen a la investigación de su procesamiento para la disminución de contaminación y la generación de subproductos de alto valor agregado. En este contexto, algunos investigadores se han enfocado en el uso de estos residuos, sobre todo para la generación de biocombustibles, o bien para el aprovechamiento de metabolitos secundarios, como compuestos fenólicos, flavonoides, saponinas, terpenos, taninos y fructanos (Carmona *et al.*, 2017; Ibarra-Cantún *et al.*, 2020; Soto-Castro *et al.*, 2021). En lo que se refiere a la utilización de estos metabolitos secundarios, se han llevado a cabo diferentes estudios con los extractos de diferentes especies de *Agave* ricos en compuestos fenólicos, saponinas y terpenos, donde se ha encontrado una amplia actividad biológica antimicrobiana, antifúngica, antiparasitaria, antioxidante, antiinflamatorias, anticáncer y antihipertensiva (cuadro 2). Ello ha dado como resultado un potencial uso para la industria de los alimentos, ya que se pueden utilizar los extractos o los compuestos aislados, y de esta forma utilizarlos para disminuir, por ejemplo, la incidencia de patógenos en los alimentos y extender la vida de anaquel de los productos. También se pueden utilizar en la industria farmacéutica como auxiliares para el tratamiento de enfermedades (Álvarez-Chávez *et al.*, 2021; Carmona *et al.*, 2017; López-Romero *et al.*, 2017).

CUADRO 2

PRINCIPALES ACTIVIDADES BIOLÓGICAS ENCONTRADAS EN LOS AGAVES

Actividad biológica	Especies de agave
Actividad antimicrobiana	<i>Agave lechuguilla</i> , <i>Agave picta</i> , <i>Agave intermixta</i> , <i>Agave impressa</i> , <i>Agave ornithobroma</i> , <i>Agave rzedowskiana</i> , <i>Agave tequilana</i> , <i>Agave schidigera</i> , <i>Agave angustifolia</i> , <i>Agave attenuata</i> .
Actividad antifúngica	<i>Agave scabra</i> , <i>Agave lechuguilla</i> , <i>Agave picta</i> , <i>Agave lophantha</i> , <i>Agave attenuata</i> , <i>Agave sisalana</i> .
Actividad antiparasitaria	<i>Agave lophantha</i> , <i>Agave brittoniana</i> .
Actividad antioxidante	<i>Agave americana</i> , <i>Agave attenuata</i> , <i>Agave tequilana</i> , <i>Agave impressa</i> , <i>Agave ornithobroma</i> , <i>Agave rzedowskiana</i> , <i>Agave schidigera</i> , <i>Agave angustifolia</i> .
Actividad antiinflamatoria	<i>Agave americana</i> , <i>Agave intermixta</i> .
Actividad anticancerígena	<i>Agave schottii</i> , <i>Agave angustifolia</i> .
Actividad antihipertensiva	<i>Agave americana</i> .

Fuente: López-Romero *et al.* (2017).

Los agaves, al ser plantas del tipo fotosintético CAM, además de presentar un amplio uso en la industria alimenticia y como fuente de compuestos bioactivos, tienen un amplio potencial para generar biocombustible debido a que son cultivados en zonas áridas, por lo que requieren poco consumo de agua y pueden tolerar condiciones ambientales extremas; así, la fibra de sus hojas puede ser utilizada para la producción de bioetanol (Niechayev *et al.*, 2019). Además, pueden ser utilizados para la biorremediación de suelo y aguas subterráneas, por ejemplo, los cultivos de *A. tequilana* pueden ser agentes hidrofobizantes para impedir la redisolución de metales pesados (Pb, Cu, Cr, Ni, Zn, Mn, Cd), e inclusive pueden ayudar a la remoción de plomo (Alcázar-Medina *et al.*, 2020a, 2020b).

PERSPECTIVAS

Los estudios generados en las últimas décadas han demostrado que el agave tiene un amplio potencial biotecnológico que puede emplearse en

la industria alimentaria para la generación de ingredientes funcionales, o bien en la industria farmacéutica para el desarrollo de nuevos fármacos, además de un creciente interés en el uso de agaves para la producción de biocombustibles y para la biorremediación de suelos y agua subterránea. Sin embargo, es necesario estudiar y generar estrategias de conservación y mejoras en los rendimientos de producción de estos cultivos. Algunas de las ya existentes se centran en el uso de los residuos generados de las industrias ya consolidadas, como el tequila y el mezcal, para la obtención de subproductos. Por lo anterior, es importante integrar los esfuerzos de investigadores, empresarios y autoridades para orientar el desarrollo de un manejo sustentable de las distintas especies de agave.

CONCLUSIONES

El agave ha sido y seguirá siendo parte de la cultura mexicana debido a la importancia que tiene tanto en la elaboración de platillos emblemáticos, como lo es la barbacoa en la región centro del país, como en la preparación de bebidas alcohólicas fermentadas (pulque) y destiladas (tequila, mezcal, bacanora). Sin embargo, en las últimas décadas se ha dado una sobreproducción de agave, principalmente para la producción de bebidas como el tequila y el mezcal, lo que ha originado que diferentes grupos de investigación se centren en el estudio del agave para mejorar los rendimientos del cultivo, además de explorar otros subproductos obtenidos de los residuos generados por estas industrias. Por lo anterior, se ha descubierto que esta planta de uso ancestral tiene un gran potencial de uso biotecnológico, que va desde su utilización como fuente prebiótica, debido a la presencia de fructanos y agavinas que puede ser benéficos para combatir la obesidad, como se ha demostrado la importancia de los agaves para la extracción de compuestos bioactivos con potencial para mejorar la salud humana, como lo son las saponinas y los compuestos fenólicos; para la elaboración de fibra para telas o inclusive como sustrato para la obtención de biocombustible o para la biorremediación de suelos. Lo anterior hace que este cultivo sea potencialmente utilizado como una fuente renovable para diferentes sectores industriales con una perspectiva sustentable y de conservación del ambiente.

REFERENCIAS

- AHUMADA-SANTOS, Y. P., Montes-Ávila, J., Uribe-Beltrán, M. J., Díaz-Camacho, S. P., López-Angulo, G., Vega-Aviña, R., López-Valenzuela, J. A., Heredia, J. B., y Delgado-Vargas, F. (2013). “Chemical characterization, antioxidant, and antibacterial activities of six *Agave* species from Sinaloa, Mexico”, *Industrial Crops and Products*, 49, 143-149.
- ALCÁZAR, M., Kind, T., Gschaedler, A., Silveria, M., Arrizon, J., Fiehn, O., Vallejo, A., Higuera, I., y Lugo, E. (2017). “Effect of steroidal saponins from *Agave* on the polysaccharide cell wall composition of *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus*”, *LWT-Food Science and Technology*, 77, 430-439.
- ALCÁZAR-MEDINA, F. A., Núñez-Núñez, C. M., Villanueva-Fierro, I., Antileo, C., y Proal-Nájera, J. B. (2020a). “Removal of heavy metals present in groundwater from a northern Mexico mining community using *Agave tequilana* Weber extracts”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(3), 1187-1199.
- ALCÁZAR-MEDINA, F. A., Núñez-Núñez, C. M., Rodríguez-Rosales, M. D. J., Valle-Cervantes, S., Alarcón-Herrera, M. T., y Proal-Nájera, J. B. (2020b). “Lead removal from aqueous solution by spherical agglomeration using an extract of *Agave lechuguilla* Torr. as biosurfactant”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(1), 71-84.
- ÁLVAREZ-CHÁVEZ, J., Villamiel, M., Santos-Zea, L., y Ramírez-Jiménez, A. K. (2021). “Agave by-products: an overview of their nutraceutical value, current applications, and processing methods”, *Polysaccharides*, 2, 720-743.
- ÁVALOS, A., y Pérez-Urria, E. (2009). “Metabolismo secundario de plantas2”, *Reduca Biología Serie Fisiología Vegetal*, 2(3), 119-145.
- CABRERA-TOLEDO, D., Vargas-Ponce, O., Ascencio-Ramírez, S., Valdez-Sandoval, L. M., Pérez-Alquicira, J., Morales-Saavedra, J., y Huerta-Galván, O. F. (2020). “Morphological and genetic variation in monocultures, forestry systems and wild populations of *Agave maximiliana* of Western Mexico: implications for its conservation”, *Frontiers in Plant Science*, 11, 817.

- CARMONA, J. E., Morales-Martínez, T. K., Mussatto, S. I., Castillo-Quiroz, D., y Ríos-González, L. J. (2017). “Propiedades químicas, estructurales y funcionales de la lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.)”, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 100-122.
- CASTILLO-QUIROZ, D., Sáenz-Reyes, J. T., Narcia-Velasco, M., y Vázquez-Ramos, J. A. (2013). “*Agave lechuguilla* Torr. de cinco procedencias bajo plantaciones”, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 78-91.
- COLUNGA-GARCÍA MARÍN, P., Torres-García, I., Casas, A., Figueredo-Urbina, C. J., Rangel-Landa, S., Delgado-Lemus, A., Vargas, O., Cabrera-Toledo, D., Zizumbo-Villareal, D., Aguirre-Dugua, X., Eguiarte, L. E., y Carrillo-Galván, G. (2017). “Los agaves y las prácticas mesoamericanas de aprovechamiento, manejo y domesticación”, en A. Casas, J. Torres-Guevara y F. Parra-Rondinel (eds.), *Domesticación en el continente americano*, vol. 2. México: UNAM / UNALM, 273-308.
- FIGUEREDO, C. J., Casas, A., Colunga-García Marín, P., Nassar, J. M., y González-Rodríguez, A. (2014). “Morphological variation, management and domestication of ‘maguay alto’ (*Agave inaequidens*) and ‘maguay manso’ (*A. hookeri*) in Michoacán, México”, *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10, 66.
- FIGUEREDO-URBINA, C. J., Casas, A., Martínez-Díaz, L., y Gutiérrez-Urbe, J. A. (2018). “Domestication and saponins contents in gradient of management intensity of agaves: *Agave cupreata*, *A. inaequidens* and *A. hookeri* in central Mexico”, *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65, 1133-1146
- FRANCO-ROBLES, E., Ramírez-Emiliano, J., y López, M. G. (2018). “Agave fructans and oligofructose decrease oxidative stress in brain regions involved in learning and memory of overweight mice”, *Natural Product Research*, 33(10), 1527-1530.
- GARCÍA-MENDOZA, A., Ordóñez, M. J., y Briones, M. (2004). “Agaváceas”, en *Biodiversidad de Oaxaca*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología, pp, 159-169.
- GARCÍA-MENDOZA, A. J. (2007). “Los agaves de México”, *Ciencias-Universidad Nacional Autónoma de México*, 14-23.

- GARCÍA-CURBELO, Y., BOCOURT, R., SAVÓN, L. L., GARCÍA-VIEYRA, M. I., y LÓPEZ, M. G. (2015). "Prebiotic effect of *Agave fourcroydes* fructans: an animal model", *Food & Function*, 6, 3177-3182.
- GSCHAEDLER, A., RODRÍGUEZ, B., PRADO, R., y FLORES, J. (2015). *Ciencia y tecnología del tequila. Avances y perspectivas*. Guadalajara, Jal.: Grupo Promueve Compañías SC.
- HODGSON, W. C., SALYWON, A. M., y DOELLE, W. H. (2018). "Hohokam lost crop found: a new *Agave* (*Agavaceae*) species only known from large-scale pre-Columbian agricultural fields in Southern Arizona", *Systematic Botany*, 43(3), 734-740.
- HUAZANO-GARCÍA, A., y LÓPEZ, M. G. (2015). "Agavins reverse the metabolic disorders in overweight mice through the increment of short chain fatty acids and hormones", *Food & Function*, 6, 3720-3727.
- IBARRA-CANTÚN, D., RAMOS-CASSELLIS, M. E., MARÍN-CASTRO, M. A., y CASTELÁN-VEGA, R. C. (2020). "Secondary metabolites and antioxidant activity of the solid-state fermentation in Appel (*Pirus malus* L.) and Agave Mezcalero (*Agave angustifolia* H.) Bagasse", *Journal of Fungi*, 6, 137.
- IGNAT, I., VOLF, I., y POPA, V. I. (2011). "A critical review of methods for characterization of polyphenolic compounds in fruits and vegetables", *Food Chemistry*, 126, 1821-1835.
- LÓPEZ-ROMERO, J. C., AYALA-ZAVALA, J. F., GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A., PEÑA-RAMOS, E. A., y GONZÁLEZ-RÍOS, H. (2017). "Biological activities of *Agave* by-products and their possible applications in food and pharmaceuticals", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98, 2461-2474.
- MÁRQUEZ-AGUIRRE, A. L., CAMACHO-RUIZ, R. M., GUTIÉRREZ-MERCADO, Y. K., PADILLA-CAMBEROS, E., GONZÁLEZ-ÁVILA, M., GÁLVEZ-GASTÉLUM, F. J., DÍAZ-MARTÍNEZ, N. E., y ORTUÑO-SAHAGÚN, D. (2016). "Fructans from *Agave tequilana* with a lower degree of polymerization prevent weight gain, hyperglycemia and liver steatosis in high-fat diet induced obese mice", *Plant Foods for Human Nutrition*, 71, 416-421.

- NAVA-CRUZ, N. Y., Medina-Morales, M. A., Martínez, J. L., Rodríguez, R., y Aguilar, C. N. (2014). "Agave biotechnology: an overview", *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(4), 546-559
- NIECHAYEV, N. A., Jones, A. M., Rosenthal, D. M., y Davis, S. C. (2019). "A model of environmental limitations on production of *Agave americana* L. grown as a biofuel crop in semi-arid regions", *Journal of Experimental Botany*, 70(22), 6549-6559.
- PADILLA-CAMBEROS, E., Barragán-Álvarez, C. P., Díaz-Martínez, N. E., Rathod, V., y Flores-Fernández, J. M. (2018). "Effects of agave fructans (*Agave tequilana* Weber var. Azul) on body fat and serum lipids in obesity", *Plant Foods for Human Nutrition*, 73, 34-39.
- PÉREZ-LÓPEZ, A. V., y Simpson, J. (2020). "The sweet taste of adapting to the desert: fructan metabolism in *Agave* species", *Frontiers in Plant Science*, 11, 324.
- PÉREZ-LÓPEZ, A. V., Simpson, J., Clench, M. R., Gómez-Vargas, A. D., y Ordaz-Ortiz, J. J. (2021). "Localization and composition of fructans in stem and rhizome of *Agave tequilana* Weber var. Azul", *Frontiers in Plant Science*, 11, 608850.
- PÉREZ-ZAVALA, M. L., Hernández-Arzaba, J. C., Bideshi D. K., y Barboza-Corona J. E. (2020). "Agave: a natural renewable resource with multiple applications", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100 (15), 5324-5333.
- PUENTE-GARZA, C. A., Meza-Miranda, C., Ochoa-Martínez, D., y García-Lara, S. (2017a). "Effect of *in vitro* drought stress on phenolic acids, flavonols, saponins, and antioxidant activity", *Agave salmiana*", 115, 400-407.
- PUENTE-GARZA, C. A., García-Lara, S., y Gutiérrez-Urbe, J. A. (2017b). "Enhancement of saponins and flavonols by micropopagation of *Agave salmiana*", *Industrial Crops & Products*, 105, 225-230.
- QUIRÓS, A., Palafox, H., Robles, R., y González, G. (2011). "Interacción de compuestos fenólicos y fibra dietaria: capacidad antioxidante y biodisponibilidad", *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 13(marzo), 3-11.
- REGALADO-RENTERÍA, E., Aguirre-Rivera, J. R., Godínez-Hernández, C. I., García-López, J. C., Oros-Ovalle, C., Martínez-Gutiérrez, F., Martínez-Martínez M., Ratering S., Schnell, S., Ruiz-Cabrera,

- M. A., y Juárez-Flores, B. (2020). "Effects of Agave fructans, inulin, and starch on metabolic syndrome aspects in healthy Wistar rats", *ACS Omega*, 5, 10740-10749.
- RENARD, C. M. G. C., Watrelot, A. A., y Le Bourvellec, C. (2017). "Interactions between polyphenols and polysaccharides: mechanisms and consequences in food processing and digestion", *Trends in Food Science & Technology*, 60, 43-51.
- REYES-SAMILPA, A., Van't Hooft, A., Reyes-Agüero, J. A., y Rubín de la Borbolla, S. (2020). "Elaborar ayates. El trabajo artesanal hñähñu del hilado y tejido en el Valle de Mezquital, México", *Itinerarios*, 31, 267-291.
- 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 & Function*, 5, 3311-3319.
- SCHEINVAR-GOTTDIENER, E. (2017). "Agave, mezcal tradicional, cultura y diversidad", *Oikos. Los agaves y el campo mexicano*, 18, 9-13.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2017). *Producción anual agrícola. Agaves*. México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- SIDANA, J., Singh, B., y Sharma, O. P. (2016). "Saponins of *Agave*: chemistry and bioactivity", *Phytochemistry*, 130, 22-46.
- SOTO-CASTRO, D., Pérez-Herrera, A., García-Sánchez, E., y Santiago-García, P. A. (2021). "Identification and quantification of bioactive compounds in *Agave potatorum* Zucc. leaves at different stages of development and a preliminary biological assay", *Waste and Biomass Valorization*, 12(8), 4537-4547.
- TOIVONEN, P. M. A., y Brummell, D. A. (2008). "Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables", *Postharvest Biology and Technology*, 48(1), 1-14.
- TORRES-GARCÍA, I., Rendón-Sandoval, F. J., Blancas, J., Casas, A., y Moreno-Calles, A. I. (2019). "The genus *Agave* in agroforestry systems of Mexico", *Botanical Sciences*, 97(3), 263-290.
- VINIEGRA-GONZÁLEZ, G. (2021). "Agave bioindustries: history and future of a strategic bioresource", *Energy: Science, Technology, and Management*, 1(1), 12-24.

CAPÍTULO 5

FUNDAMENTOS Y RETOS ACTUALES PARA EL DESARROLLO DE LOS POTENCIALES TERAPÉUTICOS DEL PEYOTE EN MÉXICO

RAÚL A. VACA GENUIT¹
MAURICIO G. GUZMÁN CHÁVEZ²

RESUMEN

Muchas de las sustancias psicodélicas con potencial terapéutico para la medicina moderna forman parte de la biodiversidad presente en el territorio nacional, como es el caso del peyote (*Lophophora williamsii*). Con el cambio de paradigma en materia de regulación de enteógenos, que intenta transitar de una prohibición absoluta hacia esquemas alternativos, es pertinente la discusión para desarrollar los potenciales terapéuticos del peyote en el país. Asumimos el carácter multidimensional del problema; discutimos sobre la regulación y no sobre legalización. La posible instauración de modelos regulatorios con una tendencia a la medicalización amenaza con imponer un discurso biopolítico a expensas de las prácticas culturales del peyote y expone el conocimiento tradicional a acciones de biopiratería. Así mismo, la implementación de un modelo de apertura hacia diversos tipos de usuarios afectados por la prohibición supondría una legitimización de la presión que pone en riesgo la conservación de la especie. Ambos umbrales regulatorios aluden limitaciones de la política internacional contra las drogas y las políticas

¹ Cátedra CONAHCYT. CONAHCYT - Programa de Estudios Antropológicos, El Colegio de San Luis, A.C

² Profesor investigador titular B. Programa de Estudios Antropológicos, El Colegio de San Luis, A.C.

de salud pública. En este trabajo presentamos los fundamentos científicos que refutan los criterios vigentes bajo los cuales conviven normas contradictorias: la de excepcionalidad y la de prohibición.

PALABRAS CLAVE: peyote; *Lophophora williamsii*; mescalina; marco regulatorio; potenciales terapéuticos, conocimiento tradicional indígena; biopiratería; salud pública; conservación de la biodiversidad.

INTRODUCCIÓN

El ser humano ha mantenido desde siempre una relación simbiótica con las plantas; sus medicinas principales a lo largo de la historia proceden del reino vegetal (Tayade *et al.*, 2013). Las plantas contienen principios activos que son moléculas producto de su metabolismo y que poseen acción farmacológica. La medicina actual no existiría sin el descubrimiento de estos principios activos, los cuales son reproducidos en laboratorio para generar medicamentos. La actividad de un principio activo varía de acuerdo con su naturaleza. Entre los principios activos presentes en plantas existen los que tienen propiedades psicoactivas, también conocidos como psicodélicos (sustancias que abren la mente) y enteógenos (sustancias que estimulan el misticismo) (Carod, 2005). Estas sustancias han sido poco investigadas en relación con su potencial medicinal (Tayade *et al.*, 2013). En particular, las culturas indígenas mexicanas han jugado un papel crucial en el interés de la comunidad científica occidental por la investigación médica, toxicológica, biológica, química y farmacológica relacionada con estas sustancias (Heinrich y Casselman, 2018).

De las numerosas sustancias psicoactivas vegetales utilizadas por las poblaciones indígenas de México, la mescalina contenida en el peyote ha sido la que ha atraído mayor atención. Este cactus tiene un historial de uso extraordinariamente largo relacionado con usos ceremoniales y medicinales, y ocupa una posición central en la etnomedicina indígena (Cassels y Sáez-Briones, 2018; Feeney, 2016; McKenna, 2004). La naturaleza química de sus componentes activos y la forma de su uso hacen que su estudio sea en particular relevante para temas contemporáneos en neurofarmacología, neurofisiología y psiquiatría (McKenna, 2004).

Particularmente en las décadas de 1950 y 1960, hubo una oleada de investigaciones sobre el peyote y otras plantas alucinógenas, asociadas con el supuesto potencial de sus compuestos psicoactivos para el tratamiento de trastornos psiquiátricos (Heinrich y Casselman, 2018; Postránecká *et al.*, 2019; Tylš *et al.*, 2014). Sin embargo, en la década de 1960, los psicodélicos también comenzaron a ganar popularidad entre el público en general, principalmente en Estados Unidos, lo que provocó pánico en la rígida sociedad de la época debido a su capacidad para afectar el sistema de valores de los individuos (Postránecká *et al.*, 2019).

Así, a pesar del uso milenario de las sustancias psicodélicas en las tradiciones etnomédicas, y a pesar de su prometedor potencial terapéutico reconocido en las décadas de 1950 y 1960, su uso (incluyendo tratamiento médico e investigación humana) fue prohibido a partir de la década de 1970 como parte y consecuencia de la guerra contra las drogas en Estados Unidos (Postránecká *et al.*, 2019; Tylš *et al.*, 2014). Esta prohibición, motivada por intereses políticos, condujo gradualmente a una prohibición mundial de los psicodélicos.

A pesar de la prohibición existente, muchos psicodélicos son ampliamente utilizados, y sus efectos “negativos” son relativamente mínimos sobre la salud mental (Krebs y Johansen, 2013; Postránecká *et al.*, 2019). Si bien muchas de estas sustancias se ubican en los listados internacionales y nacionales como drogas altamente peligrosas, con un alto potencial de abuso y sin que se les reconozca ningún uso médico, existen evidencias que indican que podrían ser herramientas seguras y efectivas para determinados tratamientos psiquiátricos. Dicha evidencia sugiere que algunos psicodélicos tienen un perfil de seguridad mucho mayor que las principales drogas adictivas utilizadas hoy en día en dichos tratamientos, niveles extremadamente bajos de mortalidad, y producen poca o ninguna dependencia física (Winkelman, 2014). Sin embargo, no existe aún una comprensión clara y concluyente respecto a los mecanismos que contribuyen a su eficacia terapéutica (Feeney, 2016). Para el caso del peyote, también persisten preguntas adicionales relacionadas con los supuestos beneficios terapéuticos del consumo de la planta en contextos ceremoniales (Bye, 1979; Feeney, 2016).

En la actualidad, ha surgido en la comunidad científica una discusión renovada sobre los usos potenciales de los psicodélicos en el tratamiento de un amplio espectro de trastornos psiquiátricos (como la depresión, el trastorno por estrés postraumático, el trastorno obsesivo-compulsivo y las adicciones); así también, como herramienta para el estudio de enfermedades psiquiátricas graves como la esquizofrenia (Bogenschutz y Johnson, 2016; Geyer y Vollenweider, 2008; Postránecká *et al.*, 2019; Viktorinová y Tylš, 2016). La noción de que los psicoactivos de origen natural pueden tener aplicaciones terapéuticas resulta aún una idea extraña y radical para la ciencia médica occidental; no obstante, la postura a favor de su uso está cada vez más respaldada por la

investigación científica actual (e.g. Grob *et al.*, 2011; Hendricks *et al.*, 2015; Moreno *et al.*, 2006; Morris, 2008; Sewell *et al.*, 2006; Winkelman y Roberts, 2007).

En México ha surgido un impulso de propuestas de reforma a la Ley General de Salud en materia de reclasificación de enteógenos de origen natural (e.g. Contreras, 2021), de solicitudes ante la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris) para autorizar la adquisición de psicotrópicos de origen natural, y amparos ante la Suprema Corte de Justicia de la Nación; todo ello, con el propósito de posibilitar el uso (recreativo, religioso, terapéutico) y desobstaculizar el desarrollo de la investigación médica, toxicológica y farmacológica del peyote y otras plantas alucinógenas (Guzmán y Labate, 2019). Sin embargo, cualquier modificación al marco regulatorio actual que permita la investigación y el desarrollo de los potenciales terapéuticos de plantas con propiedades psicoactivas en México, así como su uso recreativo y religioso, trae consigo una serie de retos de carácter político, ambiental y de salud pública, este último específicamente referido a la salud mental.

De manera particular en el caso del peyote, el reconocimiento de sus propiedades terapéuticas tiene sus raíces en el conocimiento indígena y tradicional, y en la diversidad de culturas que han cobijado y promovido su uso. Aun cuando se trata de un conocimiento de circulación culturalmente restringido por ser considerado sagrado, constituye un bien colectivo y público en el marco de las culturas que lo usan, ya que tiene funciones sociales (Guzmán, 2017). En el mundo en general, y en México en particular, no se dispone en la actualidad de un sistema de protección legal de los derechos de propiedad intelectual colectivos. Por tanto, la fragilidad de los marcos legales expone peligrosamente el conocimiento tradicional a acciones de biopiratería. En las últimas décadas, se ha intensificado la biopiratería de recursos y conocimientos tradicionales por parte de empresas privadas. Esto se debe a varios factores; primero, los avances tecnológicos han facilitado las posibilidades de encontrar nuevos componentes en la biodiversidad. Por otra parte, la universalización del sistema de patentes, impuesto por medio de los acuerdos de propiedad intelectual de la Organización Mundial de Comercio, permite privatizar los recursos que son públicos y colectivos mediante la figura de la patente, cuando se alega que bajo procedimientos

técnicos o científicos se ha logrado una invención o modificación en laboratorio (Ribeiro, 2003). El mayor riesgo en un escenario de libertad de investigación médica y farmacológica es la mercantilización del peyote bajo una lógica industrial ligada a los monopolios farmacéuticos.

Por otra parte, eliminar las barreras estructurales y legales que no sólo impiden la investigación científica, sino también otros usos de la planta del peyote, trae consigo otra serie de retos relacionados con la legalidad y legitimidad del acceso y uso de este recurso biológico presente en territorios indígenas y rurales por parte de diversos usuarios rituales, y la conservación de la especie vinculado a la garantía del derecho que tienen los pueblos indígenas a sus propias medicinas tradicionales, a mantener sus prácticas de salud y a la conservación de sus plantas medicinales.

Este trabajo presenta una revisión histórica de la aplicación de enteógenos con fines terapéuticos y su investigación científica en tratamientos médicos y farmacológicos, así como también del estado de conocimiento científico actual sobre estos compuestos. Se pone énfasis en el uso terapéutico y la investigación del peyote y la mescalina, exponiendo los fundamentos desde el campo de la salud que refutan los criterios de su clasificación actual como drogas sin ningún valor terapéutico y con alto potencial de abuso que constituyen un problema grave para la salud pública; fundamentos que cuestionan la política internacional contra las drogas y las políticas de salud pública, que, en el caso del peyote en México, obliteran la escasa pero importante base científica bajo la cual se afirman los potenciales terapéuticos del peyote, cuyos efectos positivos en la salud humana son justamente aquellos que ponderan los grupos indígenas y que la ciencia se esfuerza en comprender y corroborar. Finalmente, se propone una reflexión ante el problema que implica la exploración médica y la regulación del peyote y la mescalina, dentro del contexto multidimensional en el que se inscribe su uso y consumo.

Este capítulo se inscribe en un trabajo de investigación en curso que busca impulsar la modificación del marco regulatorio del peyote y la mescalina, a partir de un proceso multidisciplinario de reflexión que permita construir un modelo regulatorio que logre abordar de manera apropiada los diferentes retos de carácter político, sociocultural, ambiental y de salud pública que conlleva su regulación. Es mucho lo que queda abierto a discusión sobre las ideas presentadas en este trabajo, el cual no

tiene el propósito de síntesis, sino más bien de proporcionar elementos y argumentos para impulsar un proceso de diálogo por medio del cual se enriquezca una propuesta una propuesta de regulación que logre garantizar y proteger todos los derechos sociales, culturales y ambientales relacionados con el peyote y su uso.

PEYOTE, MESCALINA Y ACCIÓN FARMACOLÓGICA

El término *peyote* (cuyo significado es ‘capullo del corazón’, en lengua náhuatl) es empleado para denominar varias especies emparentadas, y también existen muchos términos usados para referirse al peyote (Bye, 1979; Slotkin, 1955). Por *peyote*, en este trabajo, nos referimos a la especie identificada botánicamente como *Lophophora williamsii* (Lemaire ex Salm-Dyck) J. M. Coulter (figura 1).

FIGURA 1



Peyote - *Lophophora williamsii* (Lemaire ex Salm-Dyck) J. M. Coulter. El peyote es un cactus globular, aplanado, sin espinas y pequeño, de 2-7 cm de altura y 4-12 de diámetro. La parte del peyote que sobresale del suelo, o parte aérea, se conoce como cabeza. La cabeza se divide en 5 y hasta 13 gajos, también llamados botones. Su crecimiento es muy lento, presentando un crecimiento de 0.5 a 1 centímetro por año. Para alcanzar la madurez (edad de floración), pueden pasar hasta 15 o 20 años. Se distribuye desde el sur de Texas hasta los estados mexicanos de San Luis Potosí, Zacatecas, Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila y Chihuahua.

Fuente: Rojas-Aréchiga y Flores, 2016.

Lophophora williamsii es un cactus endémico de las zonas desérticas del norte de México (Desierto Chihuahuense) y sur de los Estados Unidos (Clavijo, 2018). En numerosos países su consumo está prohibido; en México, Estados Unidos y Canadá, su empleo sólo está permitido en ceremonias religiosas y ritos tradicionales. Existe, además, un importante mercado negro ligado a la venta de productos derivados de esta especie por sus propiedades alucinógenas y también terapéuticas. Como consecuencia de la demanda existente y de la excesiva recolección de individuos en el medio silvestre, muchas poblaciones de *Lophophora williamsii* a lo largo de su área de distribución se encuentran en declive. El saqueo del peyote se inscribe además en un contexto de deterioro generalizado de los ecosistemas áridos y semiáridos donde se distribuye la especie, vinculado con el desarrollo de proyectos de megaminería, cultivos comerciales y otros cambios de uso de suelo (Guzmán, 2017).

Este cactus contiene más de cincuenta alcaloides aislados hasta la fecha. La mescalina, el principal alcaloide del peyote, fue sintetizada e identificada como 3,4,5-trimetoxi- β -fenetilamina en 1919 por Ernst Späth (Cassels *et al.*, 2018; Dinis-Oliveira *et al.*, 2019; Ujváry, 2014). La mescalina forma parte de un grupo de sustancias conocido como psicodélicos clásicos o alucinógenos serotoninérgicos. Este grupo de sustancias incluye también la dietilamida del ácido lisérgico o LSD, la psilocibina, la dimetiltriptamina o DMT, y la 5-metoxi-N, N-dimetiltriptamina o 5-MeO-DMT (Schaefer, 2006). Desde un punto de vista químico, los alucinógenos que son alcaloides comprenden seis grupos básicos, entre los que se encuentran las triptaminas (por ejemplo, el LSD y la psilocibina) y las fenetilaminas (por ejemplo, la mescalina) (López Sáez, 2017).

El efecto fisiológico de la mescalina y demás alucinógenos serotoninérgicos es la alteración de la función serotoninérgica en el cerebro. Todos estos agentes alucinógenos muestran un mecanismo de acción similar a través de la interacción con los receptores de 5-hidroxitriptamina (5-HT; serotonina), en particular el receptor 5-HT_{2A}, que se asocia con las alucinaciones (Cassels y Sáez-Briones, 2018; Tupper *et al.*, 2015). Por otra parte, los efectos psicológicos de estas sustancias son más difíciles de caracterizar porque son extremadamente variables. Sin embargo, todos los alucinógenos serotoninérgicos producen profundos cambios en la percepción visual, existiendo diversos tipos de sensaciones

y alucinaciones visuales (incremento de la intensidad de colores, sonidos, imágenes, luces; percepción de movimientos de objetos estables, etc.). También se pueden alterar otras percepciones y ocurrir experiencias cognitivas con estados emocionales severamente displacenteros, llegando a presentarse comportamientos psicóticos de pérdida de contacto con la realidad (Dinis-Oliveira *et al.*, 2019).

En particular, la mescalina forma parte de una subclase de sustancias psicoactivas llamadas entactógenos o empatógenos (Postránecká *et al.*, 2019). Estas sustancias producen un espectro diferente de efectos psicológicos respecto a las principales drogas psicodélicas como el LSD o la psilocibina. Los empatógenos inducen la sensación de empatía, amor y cercanía emocional con los demás. Otros alucinógenos no es que sean incapaces de producir este tipo de efecto, pero no son caracterizados tan específicamente por estas cualidades (Postránecká *et al.*, 2019; Schaefer, 2006). Cabe resaltar que la mescalina es sólo uno de los más de cincuenta alcaloides presentes en el peyote, por lo que la ingestión de la planta entera ofrece una variedad de sustancias psicoactivas que diversifican y complejizan la acción fisiológica y la experiencia psicológica (Gutiérrez, 2000).

Existen discrepancias entre diferentes investigaciones en cuanto a los efectos adversos agudos de los alucinógenos serotoninérgicos. Se señalan reacciones paranoides y ataques de pánico en algunos sujetos y un fenómeno asociado a los alucinógenos conocido como *flashbacks*, que es una reexperiencia del viaje visionario que puede ocurrir meses o incluso años después de la ingesta de la droga y que por lo general implica distorsiones visuales como *flashes* de color e intrusiones en el campo de visión (Dinis-Oliveira *et al.*, 2019). A veces las distorsiones visuales son constantes y pueden estar asociadas con el trastorno perceptivo persistente y el síndrome de nieve visual (trastornos relacionados con el uso de psicodélicos). El consumo de algunos alucinógenos triptamínicos y ergolínicos (como es el caso del LSD y la psilocibina), e incluso también de algunos alucinógenos feniletilamínicos sintéticos (como el MDMA o éxtasis), puede provocar un síndrome serotoninérgico (Ferreirós Gago, 2013; Unodc, 2018).

ORIGEN PREHISTÓRICO DEL PEYOTE

La evidencia arqueológica indica que las propiedades del peyote han sido reconocidas y veneradas durante miles de años por los indígenas de lo que hoy es el norte de México y el sur de Estados Unidos (El-Seedi *et al.*, 2005; Schultes y Hofmann, 1992; Terry *et al.*, 2006). Restos de peyote seco en sitios arqueológicos en el norte de México y el suroeste de Texas atestiguan la importancia del peyote y su uso ritual desde hace aproximadamente 5 800 y 6 000 años (Andreacchio, 2013; Cassels y Sáez-Briones, 2018; Heinrich *et al.*, 2014; Schaefer, 2006).

Los grupos indígenas que habitaban el norte de México antes de la llegada de los españoles en el siglo XVI, conocidos como las culturas del desierto, pertenecían a diversas familias lingüísticas, eran cazadores-recolectores y practicaban el nomadismo. Su antigüedad se remonta a 10 000 años. Como grupos nómadas, recorrían numerosas rutas y caminos para alimentarse y también para recolectar peyote. Con el arribo de los españoles, este patrón de uso de recursos se transformó de un modo radical (Guzmán, 2017).

Los cronistas españoles del siglo XVI consideraron a este cactus como “diabólico”, lo que llevó a su prohibición (Cassels y Sáez-Briones, 2018). En 1620, la Inquisición prohíbe el peyote, castigando a los sospechosos de consumirlo en prácticas que fueron consideradas formas paganas de adoración al diablo (Dawson, 2018; Schaefer, 2006). Así, mientras el uso ceremonial del peyote estaba extendido en el norte de México en el momento de la conquista española, la persecución religiosa lo confinó a áreas próximas a la costa del Pacífico y el suroeste de Texas, desde donde se extendió hacia el norte entre 1830 y 1880 con nuevas formas de ceremonia inauguradas por los pueblos tonkawa, kiowa y comanche.

Esta práctica religiosa fue incorporada legalmente en Estados Unidos en 1920 como la Iglesia Nativa Americana, y ha llegado desde entonces al menos hasta Saskatchewan, en Canadá (Schaefer, 2006). En México, la política prohibicionista desde la época colonial se mantiene presente en la legislación contemporánea, aunque ésta permite en la actualidad el uso legal del peyote exclusivamente a los pueblos indígenas circunscritos en el territorio nacional, como los *wixaritari*, los tepehuanes, los *náayeri* (coras) y los *rarámuri*. Estos pueblos han mantenido

vigente el culto del peyote en México, con algunas leves modificaciones desde la época prehispánica.

Los *wixaritari* preservaron el nomadismo al emprender todos los años su peregrinación desde la Sierra Madre Occidental hasta el desierto chihuahuense en la porción del Altiplano Potosino, o Wirikuta como ellos la nombran, para revivir en lo fundamental el acto de creación del sol. Es un recorrido de alrededor de 500 kilómetros a través del cual van dejando ofrendas en los lugares sagrados conforme su cosmología. Algunos autores estiman que este ritual peregrino tiene por lo menos 2 000 años de antigüedad (Gutiérrez del Ángel, 2002; Guzmán, 2017; Palafox, 1974).

USO TRADICIONAL E INDÍGENA DEL PEYOTE

El peyote se ha utilizado desde tiempos prehispánicos con fines religiosos, considerado como un elemento de intermediación entre lo humano y lo divino, así como también con fines medicinales. Chichimecas, *náayeri* (coras), pimas, opatas y tepehuanes han sido reportados como usuarios cotidianos del peyote (Sahagún, 2019 [1577]). Los usos reportados son muy diversos. Los chichimecas, por ejemplo, usaban peyote para dar ánimo, quitar la sed y el hambre, y guardarse de peligro. Combinado con alcohol, y la intervención emocional de brujos, ancianas y la danza, los guerreros chichimecas adquirirían un estado de furor bélico que los volvía temibles ante sus enemigos cuando atacaban (Powell, 1984). También se ha reportado su uso en las celebraciones de los chichimecas de Coahuila, en las que, junto con mezcal, agregaban emotividad. Su uso también facilitaba alianzas y permitía la comunicación con seres supremos (Valdés, 1995).

Lumholtz reporta el uso del peyote entre los *rarámuri* (tarahumaras) para tratar las picaduras de víbora, heridas, reumatismos, quemaduras, así como para purificar y fortalecer el cuerpo. También, en las fiestas de jículi y otras ceremonias. Este pueblo considera que los mejores chamanes son los dedicados al culto del peyote, ya que esta planta es el hermano gemelo de Tata-Dios, que es una de sus divinidades más poderosas (Rojas, 1948). Lumholtz también escribió sobre su uso por los *rarámuri* para superar la fatiga, quitar la sed y el hambre (Schultes, 1938). Otros usos reportados

para *rarámuri*, *wixaritari* (huicholes) y tepehuanes incluye la aplicación de peyote de manera externa para tratar el reumatismo, quemaduras, mordeduras de serpientes, heridas y enfermedades de la piel (Schultes, 1938).

De manera similar, los *rarámuri* aplican peyote triturado externamente como unguento (Bennett y Zingg, 1935). Bennett y Zingg (1935) también reportan que los bailes de *hicouri* (peyote) en esta tribu son más frecuentes en épocas de enfermedad. Los *rarámuri* creen que la enfermedad que resulta de tocar o romper *Datura meteloides* sólo se puede curar con peyote (Schultes, 1938). También consideran al peyote como una fuerza ambigua que puede ayudar a los humanos con dones, pero que al mismo tiempo puede ser temible si ocurren ciertos acontecimientos, como pisarlo accidentalmente y no recibir la atención necesaria (Benciolini, 2012).

Entre los zacatecos –hoy extintos–, el peyote era venerado por encima de todos los demás remedios vegetales. En Coahuila, Alfonso Fabila reporta el uso del peyote por la tribu *kikapoo* (Fabila, 1945). Por su parte, los *náayeri* (coras) utilizan el peyote en varios rituales agrícolas, curativos y católicos. Algunos coras van a Real de Catorce para recolectar peyote, aunque no muestran la organización ritual de los *wixaritari* (Benciolini, 2012).

En cuanto al uso del peyote en Estados Unidos, las tribus de Oklahoma, por ejemplo, lo utilizan para tratar enfermedades como neumonía, escarlatina, tuberculosis, enfermedades intestinales, dolores reumáticos, diabetes, gripe, fiebres y resfriados. Entre los *kiowa*, los botones de mezcal se mastican y se empaquetan alrededor de un diente dolorido para calmar el dolor. Se ha reportado que este tipo de terapia dental también la practican los *delaware*. Los *shawnee* usan té de peyote para hacer lavado antiséptico de heridas abiertas, y también lo aplican tibio en extremidades adoloridas, como calmante.

En el caso de México, el uso terapéutico de *Lophophora williamsii* actualmente no se limita a la población indígena (Schultes, 1938). Ésta y otras plantas medicinales se han vuelto de gran importancia local en la medicina popular mexicana (Heinrich *et al.*, 2014), y se ofrecen a la venta en los mercados en muchas partes de México. Más aún, el peyote ha sido incluido oficialmente en la Farmacopea Mexicana (Schultes, 1938). Al peyote también se le reconocen cualidades antibióticas, alivia el malestar estomacal y, a veces, se usa en el parto para acelerarlo y reducir la pérdida de sangre (Schaefer, 2006; Schultes, 1938).

En términos generales, Slotkin (1955) clasifica los usos del peyote en individual y colectivo en rituales. Según este autor, el uso individual (para reducir la fatiga y el hambre, como medicina, para inducir visiones con fines de revelación sobrenatural, como amuleto y como intoxicante), y el uso colectivo en rituales de tribus indígenas, ambos, son igualmente antiguos. Diversos autores resaltan la importancia del peyote como medicina para las culturas indígenas de México y Estados Unidos, aunado al atractivo de las propiedades que hacen del peyote un estimulante y tónico notable. Los chamanes de diversas etnias indígenas integran holísticamente el conocimiento de los poderes curativos de esta planta sagrada en sus prácticas, las cuales requieren de una comprensión botánica, medicinal, farmacológica, psicológica y esotérica de los espacios naturales, humanos y sobrenaturales. Los chamanes actúan como sanadores y consejeros; purifican a los individuos; interpretan y adivinan los sueños, visiones y presagios que aparecen para sus pacientes y comunidades; también conocen la causa de las enfermedades, las diagnostican y las curan (De la Garza, 2012; Schaefer, 2006). Tienen gran experiencia con estas plantas y conocen sobre las cantidades y aditivos que se deben utilizar (Schaefer, 2006). Por el contrario, su uso terapéutico en la opinión pública se considera en la actualidad esencialmente como supersticioso, pseudoterapéutico y dañino como cualquier otra droga.

Los datos arqueológicos, las crónicas de los españoles del siglo XVI y el cúmulo de etnografías existentes atestiguan la importancia del peyote y su largo y extendido uso. A su vez, el mantenimiento del culto del peyote ha permitido conservar los conocimientos medicinales asociados a su uso, que han sido la fuente del interés en las propiedades de esta planta por parte del mundo científico occidental.

INVESTIGACIÓN TEMPRANA SOBRE EL PEYOTE Y OTRAS SUSTANCIAS PSICOACTIVAS

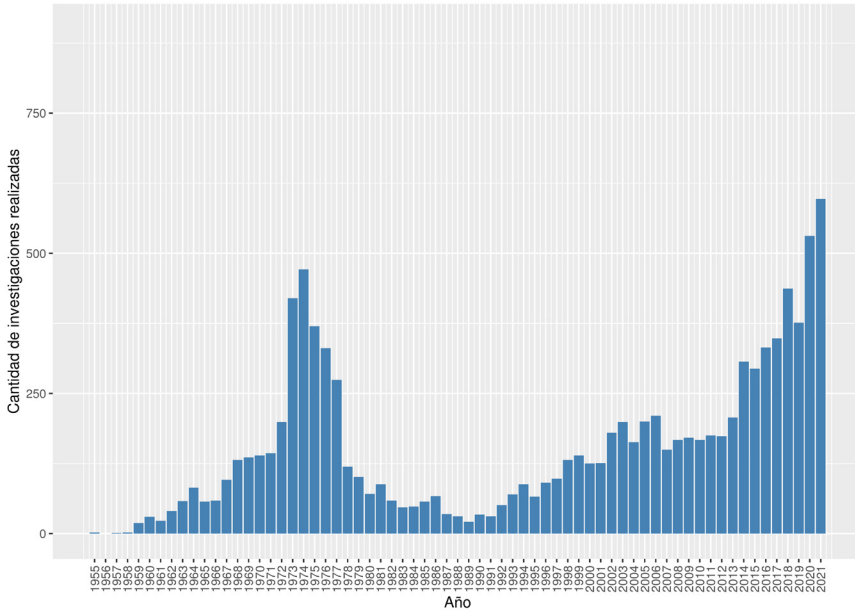
El interés científico en las propiedades narcóticas del peyote comenzó en la segunda mitad del siglo XIX. En este periodo, se aisló su principal alcaloide, la mescalina, y se demostró su efecto psicodélico (Aday *et al.*, 2019; Cassels y Sáez-Briones, 2018). México contribuyó considerablemente al

estudio del peyote (y de otras plantas con sustancias psicoactivas), a través de la investigación llevada a cabo en el Instituto Médico Nacional (IMN) (1889-1915) (Pérez Montfort, 2016). El IMN fue creado con el propósito de investigar la llamada terapéutica nacional (i.e. la terapéutica basada en el conocimiento empírico conservado en la tradición popular) y traducir las prácticas de la medicina empírica al lenguaje de la ciencia. En total, veintiún plantas con posibles propiedades psicoactivas se estudiaron en el IMN, incluyendo el peyote, que se integró oficialmente en su plan de trabajo para 1899 (Morales y Ortiz, 2015).

Durante la primera mitad del siglo XX se estaban descubriendo y examinando los efectos en la mente de otros psicodélicos (Morales y Ortiz, 2015). El descubrimiento de las propiedades psicoactivas del LSD en 1943 se presenta a menudo como el principal acontecimiento que desencadenó el auge de la investigación en este periodo. Sin embargo, la mescalina ya estaba siendo investigada por sus usos en psicoterapia y como modelos de psicosis antes de que se descubrieran los efectos del LSD (Aday *et al.*, 2019).

A partir de la década de 1950, hubo un incremento considerable en la investigación de los efectos de las drogas psicodélicas. Gran parte de la investigación llevada a cabo se centró predominantemente en dos campos: (1) en su aplicación clínica como posible complemento de la psicoterapia debido a su potencial para tratar enfermedades como el alcoholismo, la depresión y la ansiedad; y (2) en su uso como modelo para el estudio de la psicosis y la esquizofrenia (Aday *et al.*, 2019). A pesar de los resultados prometedores sobre los efectos de estas drogas, comenzó en Estados Unidos una presión política que llevó a una recategorización de diversos psicodélicos clásicos como drogas peligrosas, lo que definió todo uso como criminal y detuvo la investigación sobre estas sustancias en la década de 1970 (figura 2) (Aday *et al.*, 2019; Dinis-Oliveira *et al.*, 2019; Tupper *et al.*, 2015). La legislación que restringía el uso de sustancias psicoactivas en Estados Unidos hizo eco en México, donde se redefinió a estas sustancias como adictivas y peligrosas para la salud pública (Morales y Ortiz, 2015; Pérez Montfort, 2016).

FIGURA 2



Variación en el número de investigaciones sobre sustancias alucinógenas publicadas anualmente. Los datos fueron obtenidos mediante una consulta en el buscador de literatura científica Scopus (consultado el 23 de noviembre de 2021). Se obtuvo un total de 10 267 registros. La investigación sobre psicodélicos muestra un auge a partir de 1958, y se evidencia el efecto de la prohibición de estas sustancias en la caída registrada en el número de investigaciones a partir de mediados de la década de 1970. La investigación que siguió con posterioridad a dicho periodo se enfocó en la taxonomía y caracterización de las moléculas, más que en estudios con pacientes como ocurrió con anterioridad. El repunte en la investigación sobre psicodélicos que se observa en los últimos años se relaciona con un resurgimiento de investigaciones sobre potenciales terapéuticos y estudios con pacientes.

Fuente: Elaboración propia.

INVESTIGACIÓN MÉDICA RECIENTE SOBRE PSICODÉLICOS

Hoy en día, el resurgimiento de paradigmas médicos en contraposición al paradigma cultural de las drogas que se impuso sobre los primeros en la década de 1970, aunado al surgimiento de nuevos paradigmas en psicología, han modificado las formas en que se conceptúa y se estudia la mente. También han surgido nuevos procedimientos de investigación

para estudiar el cerebro (como la resonancia magnética funcional o IRMf). Estos avances han impulsado de nueva cuenta la investigación de drogas psicodélicas, como la dietilamida del ácido lisérgico (LSD), la psilocibina, N, N-dimetiltriptamina (ayahuasca y jurema) y metilendioximetanfetamina (MDMA) (figura 2) (Aday *et al.*, 2019; Bogenschutz y Johnson, 2016; Dinis-Oliveira *et al.*, 2019; Tupper *et al.*, 2015).

En particular, la investigación de compuestos similares a la mescalina ha comenzado recientemente a recibir el apoyo de gobiernos de diversas partes del mundo y las autorizaciones necesarias para su investigación (Feeney, 2016). Tras la validación de la investigación preclínica y varios ensayos clínicos piloto, se ha afirmado que la mescalina (al igual que otras sustancias psicoactivas) es útil para el tratamiento de la depresión, la ansiedad, el dolor de cabeza, el trastorno obsesivo compulsivo y la adicción a determinadas sustancias como el etanol (Bogenschutz y Johnson, 2016; Dinis-Oliveira *et al.*, 2019; Nichols, 2016; Winkelman, 2014). Los efectos agradables y la sensación de bienestar que proporciona el consumo de mescalina contribuyen a superar los síntomas de abstinencia de etanol y a una menor reincidencia (Dinis-Oliveira *et al.*, 2019; Nichols, 2016). El tratamiento del alcoholismo es la aplicación terapéutica más conocida de esta sustancia. Diversos enfoques guían actualmente la investigación sobre psicodélicos (Aday *et al.*, 2019; Thompson y Szabo, 2020; Yensen, 1996), algunos de ellos mantienen paralelo con la investigación temprana sobre estas sustancias, otros son novedosos. Entre éstos cabe mencionar:

1. El enfoque psicotomimético (imitador de psicosis), que sostiene que los alucinógenos son drogas que inducen un estado mental parecido a la psicosis y, por tanto, pueden servir como modelo de laboratorio para su estudio. En este sentido, los psicodélicos vuelven a ser considerados como modelo para el estudio de la psicosis y la esquizofrenia.
2. El enfoque psicólitico, que considera a estas sustancias como fármacos que alteran la relación entre las partes consciente e inconsciente de la personalidad y pueden facilitar la psicoterapia. Uno de los usos iniciales de los psicodélicos fue como complemento de la psicoterapia. Continuando con esta tradición, los psicodélicos

vuelven a ser considerados como un complemento de las técnicas terapéuticas tradicionales para el tratamiento de trastornos del estado de ánimo. En este sentido, hallazgos recientes en estudios de psicoterapia asistida por psicodélicos han resultado prometedores y han hecho que la investigación psicodélica sea cada vez más difícil de ignorar en esta área de investigación.

3. Los psicodélicos como enfoque novedoso para el tratamiento de enfermedades autoinmunes. Los psicodélicos serotoninérgicos clásicos han ganado recientemente interés como moduladores de las funciones inmunitarias. Un pequeño número de estudios científicos en una variedad de campos de investigación sugieren que los psicodélicos podrían atenuar los efectos de enfermedades autoinmunes o incluso resolver la autoinmunidad.

Dada la comprensión limitada que aún se tiene de los efectos clínicamente relevantes de los alucinógenos clásicos, existe una gran cantidad de oportunidades en la actualidad para la investigación sobre estas sustancias, investigación que podría aportar nuevos conocimientos y conducir a nuevos tratamientos médicos (Bogenschutz y Johnson, 2016).

OTROS MODELOS PROPUESTOS DE APLICACIÓN TERAPÉUTICA DEL PEYOTE

A pesar del fuerte enfoque de la biomedicina occidental en la farmacología, se debe reconocer que las propiedades farmacológicas de cualquier fármaco sólo se relacionan con una parte de su efecto total. En este sentido, y para el caso de los psicodélicos, algunos autores afirman que es necesario considerar otros modelos de aplicaciones terapéuticas de estas sustancias, que incluyen la dimensión cultural, presente, por ejemplo, en las ceremonias del peyote.

Feeney (2016) señala que los efectos terapéuticos y beneficiosos del peyote en contexto ceremonial no se pueden explicar exclusivamente por la acción farmacológica de sus componentes activos. El valor terapéutico del peyote en dicho contexto sólo se entiende en términos holísticos, teniendo en cuenta también los elementos del contexto y el significado en

el proceso de curación. Por medio de un estudio del uso ceremonial del peyote dentro de la Iglesia Nativa Americana, el autor ofrece un modelo de acción terapéutica que permite explicar los factores que contribuyen a la acción terapéutica del peyote dentro de un contexto ceremonial y el poder detrás de los usos médicos tradicionales de este cactus, demostrando que el peyote puede actuar como una medicina eficaz cuando se aplica metódicamente en un contexto ceremonial donde se brinda guía espiritual, se experimenta el apoyo del grupo y se pueden manipular símbolos culturalmente destacados para crear narrativas de curación. De esta forma, el peyote, utilizado como psicodinamizador o herramienta, contribuye a estados psicoespirituales que abren al individuo emocionalmente, disminuyen sus mecanismos de defensa y aumentan su receptividad a nuevas experiencias cognitivas, como lo han reportado Kindl (2013) y Guzmán-Chávez y Noyola-Cherpitel (2022) en el caso de los *wixaritari*.

De este tipo de exploración, surgen el llamado neochamanismo, los movimientos *New Age* y los nuevos grupos no reconocidos por la Iglesia Nativa Americana formados por no indígenas que no cargan con la tradición cultural (Muneta, 2020), y personas que se sienten identificadas con estas tradiciones y que deciden establecer una comunicación intercultural a través del turismo místico-espiritual (Basset, 2012; Guzmán, 2017). Esta forma de uso terapéutico del peyote se ve cuestionada en la actualidad por el incremento de usuarios asociado al turismo psicodélico, por prácticas de recolección inadecuadas, a traficantes de peyote, y otros factores socioambientales. Todos estos factores están conduciendo a problemas de escasez de peyote en México y ponen en peligro la conservación de la especie. En este contexto, se cuestiona si es posible atender la demanda existente sobre esta planta sin que se afecte a sus poblaciones en ciertos territorios donde se concentra su uso, como es el caso del desierto de Wirikuta, y provocar conflictos en las comunidades locales por la legitimidad de su acceso y uso.

Se debaten algunas alternativas en curso; por ejemplo, grupos indígenas de México que han reportado y condenado la exportación de peyote mexicano por parte de extranjeros, incluidos miembros de la Iglesia Nativa Americana, recomiendan que el gobierno estadounidense legalice el cultivo privado de peyote en aras de proteger las poblaciones mexicanas de este cactus (Muneta, 2020; Terry, 2008). Los especímenes cultivados

crecen a mayor velocidad que en condiciones silvestres, y tardan entre seis y diez años en alcanzar la madurez, en contraste con los quince a veinte años que tardan en su medio natural. De esta forma, el cultivo del peyote (no sólo en Estados Unidos, sino también en México) se presenta como una posible solución para el problema de la sobrexplotación y la creciente disminución en su disponibilidad (Terry y Trout, 2013).

Cabe señalar que existe un amplio conocimiento sobre su cultivo y existe abundante documentación al respecto (por ejemplo, Gottlieb, 1997), así como también guías de cultivo disponibles en Internet que detallan las condiciones óptimas para su crecimiento y las prácticas adecuadas para su manejo y cuidado. Sin embargo, diversos factores hacen difícil pensar en que el cultivo de peyote pueda, en el corto plazo, remplazar la extracción de individuos del medio silvestre; entre otros, el tiempo de crecimiento que, aunque menor, sigue siendo lento en condiciones de cultivo, y la baja concentración de mescalina en plantas criadas en invernaderos, en comparación con plantas silvestres.

También se han propuesto formas alternativas de cosechar el peyote (que buscan evitar la extracción de la planta completa, que comúnmente se hace), que consiste en cortar la parte superior de la cactácea (los botones o cabeza), dejando parte del tallo y la raíz intacta para permitir que la planta se regenere y produzca nuevas cabezas en tiempos relativamente cortos (Ermakova, 2019; Terry *et al.*, 2012; 2014). Finalmente, Luna (2021), propone el uso de mescalina producida sintéticamente, junto con el cultivo de otros cactus ricos en mescalina, como una solución más ética y sostenible para satisfacer las crecientes demandas del enteógeno.

ESTATUS LEGAL Y REGULATORIO DEL USO DEL PEYOTE Y LA MESCALINA

En la actualidad, el peyote se encuentra regulado en México por tres tipos de normas: sanitarias, penales y ambientales, así como por un conjunto de normas internacionales, las cuales anteceden o refuerzan las disposiciones presentes en las regulaciones nacionales (Guzmán, 2020).

En el ámbito internacional, el principal alcaloide psicoactivo del peyote, la mescalina, es controlada por un marco regulatorio en materia de control

de drogas. Este corpus normativo está integrado por la Convención Única de 1961 sobre estupefacientes, enmendada por el Protocolo de 1971 de Modificación de la Convención Única de 1961 sobre estupefacientes, el Convenio sobre Sustancias Psicotrópicas de 1971 y la Convención de las Naciones Unidas contra el Tráfico Ilícito de Estupefacientes y Sustancias Psicotrópicas de 1988. Estos tratados funcionan fundamentalmente por medio de un sistema de listas catalogadas de acuerdo con el valor terapéutico percibido y riesgo potencial de abuso de cada sustancia (Contreras, 2021).

La mescalina se encuentra incluida en la lista I del Convenio sobre Sustancias Psicotrópicas de 1971, por lo que se considera una sustancia cuyo uso, venta y fabricación está prohibida. Sin embargo, además del *cannabis*, el opio y el arbusto de coca, ninguna otra planta se encuentra sometida a control internacional. Esto significa que la planta del peyote no se incluye en las listas de dichos convenios, aunque su regulación depende de la legislación de cada país. En este sentido, en México, la legislación sobre el uso de plantas alucinógenas es más prohibitiva y represiva que el propio sistema internacional sobre control de drogas de las Naciones Unidas. Mientras que este último sólo fiscaliza la mescalina de naturaleza sintética o aquella en la que existen sofisticados procesos químicos que conlleven a su extracción (Contreras, 2021; Winkelman, 2014), la Ley General de Salud de México de 1984 incluyó a *Lophophora williamsii* (la planta del peyote) en el numeral I del artículo 245, considerándola una especie que “tienen valor terapéutico escaso o nulo y que, por ser susceptibles del uso indebido o abuso, constituyen un problema especialmente grave para la salud pública”.

Lo anterior ha traído como consecuencia que las prácticas culturales, los saberes ancestrales y la medicina indígena relacionados con el peyote se encuentren constreñidas y oprimidas por la propia legislación mexicana (Contreras, 2021). El Código Penal Federal considera castigables penalmente las conductas (producción, transporte, tráfico, comercio, suministro aun gratuito o prescripción, y otros actos en materia de narcóticos) que se relacionan con los psicotrópicos y demás sustancias previstas en el artículo 245, fracciones I, II, y III de la Ley General de Salud. Las penas previstas para estos “delitos contra la salud” van de diez a veinticinco años de prisión y de cien hasta quinientos días de multa. Aunque existe una excepción prevista en el código penal para los grupos

indígenas (este estado de excepción se aplica para los *wixaritari*, los tepehuanes, los *náayeri* (coras) y los *rarámuri*) que demuestren que el uso del peyote es importante para su reproducción social y cultural, este estatus legal del peyote es precario, lo cual ha ocasionado, por ejemplo, que en varias ocasiones grupos enteros de peregrinos *wixárikas* hayan sido encarcelados por transportar peyote (Guzmán, 2013; Guzmán, 2017).

Finalmente, en materia ambiental, tras la firma del Convenio sobre la Diversidad Biológica en 1992, se impulsaron en México mecanismos para la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad. En este sentido, se emitió la NOM 059, publicada en 1994 y reformada en 2010, establecida bajo el marco de la Ley General de Vida Silvestre (2006). Esta NOM identifica las especies o poblaciones de flora y fauna silvestres en riesgo en la república mexicana mediante la integración de listados, y constituye el principal instrumento para la protección y conservación de flora y fauna en México mediante el establecimiento de especificaciones para su protección. El peyote se incluye en la NOM 59 como especie “sujeta a protección especial”, categoría que se refiere a “aquella (especie o subespecie) sujeta a limitaciones o vedas en su aprovechamiento por tener poblaciones reducidas o una distribución geográfica restringida, o para propiciar su recuperación y conservación o la recuperación y conservación de especies asociadas”. La categorización del estado actual de conservación del peyote en México a través de la NOM 59, es acorde con el criterio adoptado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) en su Libro Rojo de Especies Amenazadas, en donde el peyote es clasificado como especie en estado “vulnerable”.

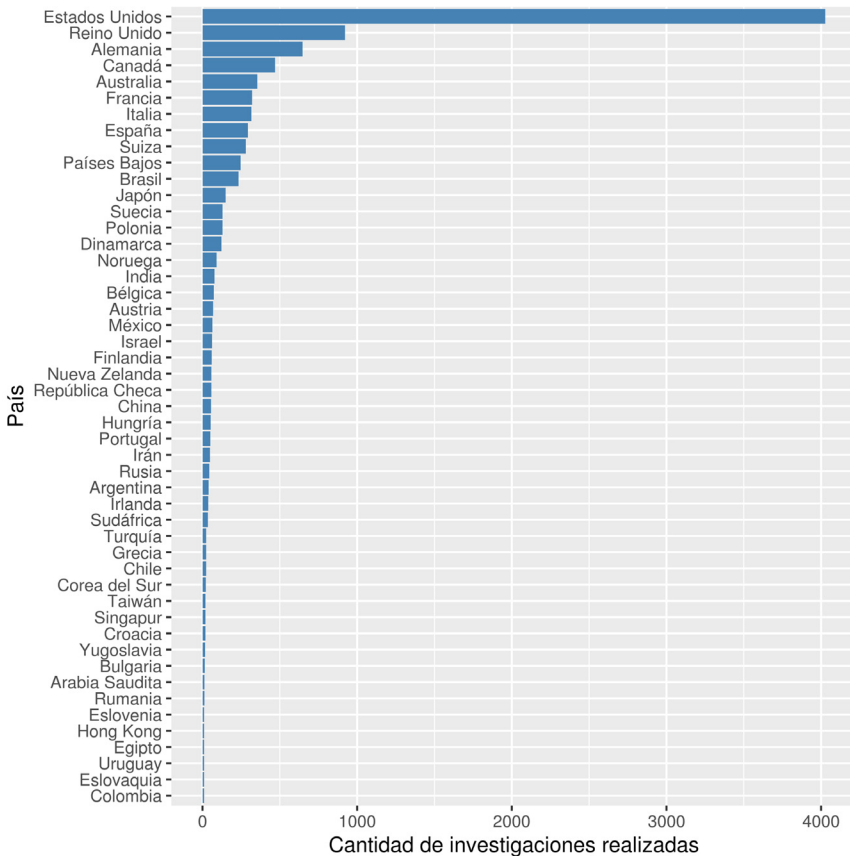
LA JUSTIFICACIÓN DE LOS ESTUDIOS MÉDICOS DEL PEYOTE

En México y muchos otros países, el debate sobre el cambio de los marcos regulatorios de las plantas psicotrópicas actualmente prohibidas (y las sustancias alucinógenas asociadas) no sólo está motivado por el evidente incremento de consumo de drogas y el fracaso de las políticas antidrogas. También corresponde a una transformación en la visión de la sociedad y el Estado, detonada por paradigmas actuales como la reducción de daños, los derechos humanos y el respeto a las libertades religiosas.

Muchos de los argumentos en estos debates se relacionan principalmente con el área de la salud (Hernández y Sotelo, 2013). En este sentido, los paradigmas médicos que han resurgido en contraposición al enfoque biopolítico y punitivo imperante de las drogas abogan por la importancia de impulsar la investigación de usos médicos de estas sustancias mediante ensayos clínicos (incluyendo su eficacia terapéutica, el perfil de seguridad, los efectos adversos agudos a corto, mediano y largo plazo, y el potencial de abuso), así como también de mejorar la prevención de adicciones.

El debate en torno a la legalización de plantas psicoactivas prohibidas en la actualidad surgió primero con la marihuana. Dicha controversia ha facilitado el camino para iniciar el debate sobre la regulación de otras plantas y hongos enteogénicos. Esto es notorio en América Latina en el caso de la ayahuasca en Perú y Brasil y la hoja de coca en Bolivia y Perú. Asimismo, la investigación de compuestos similares a la mescalina ha comenzado a recibir el apoyo de diversos gobiernos, y las autorizaciones necesarias para su investigación (Feeney, 2016). En México, sin embargo, el régimen de control de drogas y delitos contra la salud sigue obstruyendo y paralizando la investigación médica, toxicológica y farmacológica sobre el peyote y la mescalina. Esto, a pesar de que México es el principal país donde crece el peyote y el que alberga las culturas indígenas que tienen un historial de uso medicinal extraordinariamente largo de este cactus y que han sido las motivadoras del interés de la comunidad científica occidental por su investigación, con lo cual cabría esperar que México se encontrara a la vanguardia en la investigación de los potenciales terapéuticos del peyote. Conforme a la Ley General de Salud, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris), por medio de su Comisión de Autorización Sanitaria, es la encargada de evaluar y expedir las autorizaciones que se requieran para el fomento sanitario, que incluye la investigación para la salud relacionada con estupefacientes, psicotrópicos y sustancias controladas. Sin embargo, lograr obtener los registros y autorizaciones necesarios para su desarrollo implica largos procesos y planteamientos a las autoridades, que en la práctica han funcionado como un mecanismo para detener las autorizaciones y obstaculizar la investigación (figura 3).

FIGURA 3



Variación en el número de investigaciones históricas sobre sustancias alucinógenas publicadas por país.

Fuente: Los datos fueron obtenidos mediante una consulta en el buscador de literatura científica Scopus (consultado el 23 de noviembre de 2021). Se obtuvieron un total de 10 267 registros. Sólo se muestran los países con un registro histórico mayor a diez publicaciones.

En lo que se refiere de manera particular al peyote, desde el campo e interés de la medicina moderna, existen diversos argumentos que señalan la necesidad de un marco regulatorio apropiado para el desarrollo de investigaciones clínicas controladas sobre sus efectos y potenciales terapéuticos. El principal argumento, por supuesto, es que el peyote y sus compuestos psicoactivos pueden tener aplicaciones terapéuticas (las

cuales han sido descritas a lo largo de este trabajo), y dado que hasta la fecha no se ha esbozado de manera concluyente una comprensión precisa de los mecanismos que contribuyen a su eficacia medicinal y terapéutica, éstos requieren de investigación dentro del contexto de estudios clínicos bien diseñados. Adicionalmente, la importancia para México de investigar los efectos adversos potenciales del consumo de peyote y mescalina a corto, mediano y largo plazo se sustenta en los siguientes argumentos:

- Primero, a pesar de su prohibición, el uso y consumo de peyote en México no sólo se ha mantenido, sino que se ha expandido (principalmente entre usuarios no indígenas tanto mexicanos como extranjeros que llegan al país para tal propósito). Si bien el uso actual de mescalina pura, ya sea aislada de fuentes naturales o sintetizada en el laboratorio, parece ser poco frecuente, la ingestión de peyote ha trascendido las fronteras étnicas mediante procesos de hibridación e interculturalidad que han hecho que la cultura asociada a su consumo sea reproducida por nuevos y cada vez más actores.
- Segundo, los pueblos indígenas de México que consideran el peyote como parte de su cosmogonía continúan usando el cactus como un sacramento religioso, incluyendo a los *wixaritari*, coras, tepehuanes y tarahumaras. Según datos de 2003, sólo la población *wixárika* abarcaba cerca de 44 000 personas, población potencialmente consumidora de peyote.
- Tercero, el peyote también es ampliamente utilizado por un grupo de la población mestiza de México como medicina para tratar variedad de dolencias físicas (las cuales han sido descritas previamente en este trabajo).
- Cuarto, la expansión de los rituales de la Iglesia Nativa Americana en suelo mexicano ha dado origen a la Iglesia Nativa Americana de México (INAM) que busca su registro ante la Dirección General de Asociaciones Religiosas de la Secretaría de Gobernación para poder realizar rituales que incluyen el consumo de peyote. Sólo en Estados Unidos, la Iglesia Nativa Americana cuenta con más de 250 organizaciones que congregan alrededor de 650 000 miembros, y consumen entre cinco y diez millones de botones de peyote al año (Guzmán y Labate, 2019).

Todos los argumentos expuestos evidencian la persistencia del uso del peyote por grupos indígenas en contextos ceremoniales y rituales, y el aumento del consumo de peyote entre población no indígena para usos religiosos, ceremoniales y medicinales, sustentando la importancia, desde el punto de vista de la salud pública, de desarrollar investigación médica y toxicológica de los efectos del consumo de peyote y mescalina.

RETOS PARA LA REGULACIÓN DEL PEYOTE Y LA MESCALINA

El prohibicionismo de sustancias psicotrópicas tuvo que ver más con la estigmatización, la reprobación moral y la criminalización, que con conocimientos científicos sobre dichas sustancias (Gutiérrez, 2000; Pérez Montfort, 2016; Tenorio, 1991; 2010). Hoy en día, la acumulación de evidencia científica que refuta los criterios de clasificación de varias de estas sustancias como drogas sin ningún valor terapéutico y con un alto potencial de abuso, sumado a los diversos estudios históricos sobre las políticas prohibicionistas que demuestran su inconsistencia y fracaso, y al cambio de paradigma regulatorio hacia un enfoque de derechos humanos, están dejando ver que el modelo prohibicionista se está volviendo obsoleto. De esta forma, mucha de la discusión actual ya no se centra tanto en si es apropiado o no modificar el *statu quo* de los marcos regulatorios, sino que se centra más bien en determinar de qué manera es conveniente regular (Pettitt, 2012).

En cuanto al peyote y la mescalina, si bien es cierto que su investigación está menos avanzada en relación con otras sustancias, como la ayahuasca, el DMT y la psilocibina, estudios preliminares sugieren que su uso es razonablemente seguro en contextos adecuadamente estructurados, al mismo tiempo que muchos investigadores están de acuerdo en que no son narcóticos que crean hábito (Dinis-Oliveira *et al.*, 2019). Sumado a ello, su eficiencia terapéutica se ha comprobado, principalmente en el tratamiento del alcoholismo.

La experiencia lograda hasta el momento en la regulación de plantas enteogénicas como el *cannabis*, la ayahuasca y la hoja de coca permiten enriquecer la reflexión sobre el caso del peyote, aunque es importante no perder de vista la especificidad ecológica que requiere el análisis de

cada una de estas especies. El peyote es una planta de crecimiento lento y con una distribución restringida, por lo que el continuo incremento en su colecta en zonas específicas (*v.gr.* el sitio sagrado natural de Wirikuta) por un número creciente de usuarios pone en peligro su preservación, situación que tendencialmente podría agravarse en el caso de que la posible regulación no cuente con estrategias adecuadas de conservación.

A partir del enfoque de la ecología política, cabe distinguir los posicionamientos e intereses de los diversos actores que confluyen en lo que Guzmán y Labate (2019) han distinguido como campo peyotero. Creemos que el hilo conductor para dirimir divergencias es la conservación de esta especie entre el conjunto de especies que conforman la biodiversidad del Desierto Chihuahuense. Sin eludir las cuestiones inherentes a su mercantilización y posible desacralización mediante la operatividad tecnocientífica y la política internacional de patentes, la regulación que ponderamos como posible vía de su gestión en el mercado de las espiritualidades y las terapéuticas ancestrales resituadas en la modernidad, pone especial énfasis en la conservación bajo el reconocimiento de bienes culturales, patrimoniales de carácter colectivo. Esto supondría la reformulación de las leyes sanitarias y penales existentes que restringen y criminalizan la investigación científica y convierten a los usuarios en infractores de la ley. Los consensos hoy inexistentes deben ser construidos por un árbitro fiable que admita la multidimensionalidad del problema. Más que un árbitro como ente jurídico, debemos pensar en el arbitraje como el proceso mismo de la construcción de consensos. Algunos modelos, como el conducido por el Consejo Nacional Antidrogas (Conand) en Brasil para la autorización del uso religioso de la ayahuasca, pueden servir como guías para pensar en la creación de un equipo multidisciplinario formado por abogados, psiquiatras, antropólogos, ecólogos, representantes indígenas y campesinos y académicos. Entre sus funciones, subrayamos la importancia de elaborar y determinar:

1. Un padrón actualizado de usuarios.
2. Las principales áreas de colecta, las dimensiones e impactos ecológicos de su explotación.
3. Los protocolos de investigación en campo para analizar los efectos en la salud de los distintos tipos de usuarios.

4. Los efectos políticos, económicos y sociales del turismo peyotero en las zonas de colecta.
5. El diseño de propuestas basadas en la comunidad que favorezcan la conservación por medio del establecimiento de zonas de veda, recuperación o restauración.
6. Los mecanismos jurídicos y éticos para que las instituciones académicas asuman compromisos en el desarrollo de la investigación biomédica y farmacológica.

No existe una ruta que apele al camino correcto, sino muchos senderos que recorrer frente al desafío de mantener una normatividad que esencializa los atributos culturales del peyote, criminaliza a los usuarios no indígenas y coloca obstáculos para su conservación y estudio, o bien ajustar dicho marco normativo hacia una conciliación de intereses y objetivos.

En este texto, nuestra discusión se ha enfocado básicamente en destacar los avances en torno a los potenciales terapéuticos, y aunque es ineludible el tema de los marcos regulatorios, no pretendemos zanjar la discusión en sus acepciones jurídicas. De cualquier forma, para nosotros ha sido importante desligar la regulación de la descriminalización y la despenalización. Aun cuando los criterios y las metodologías científicas para definir tasas de extracción y umbrales de riesgo, amenaza o peligro de extinción de una especie puedan ser relativos o controvertidos, no los desestimamos; todo lo contrario, les concedemos una importancia crucial para debatir estrategias de conservación. Por ello creemos justamente que la regulación no debe crear *de jure* un acceso irrestricto que acelere el saqueo (Gutiérrez, 2000), sino definir reglas claras que sean respetadas por todos los actores potencialmente interesados en su uso.

De igual forma, dado que no existen en nuestro país mecanismos que reconozcan y protejan la propiedad colectiva de los conocimientos tradicionales asociados al uso de plantas medicinales, recomendamos que este debate sea abordado urgentemente para enmarcar la bioprospección en el campo del desarrollo biotecnológico mexicano; es decir, dentro de las instituciones nacionales, bajo riesgo, en caso de no hacerlo, de dar pie a la biopiratería por omisión.

Para concluir, estamos de acuerdo con Ortiz Monasterio y Mohar Acedo (2021) en que no es una tarea sencilla transponer o ajustar los marcos

normativos (derechos indígenas, ambiental, salud pública y penales) sin destapar nuevos riesgos o conflictos. No obstante, consideramos que el debate informado es necesario si lo que lo anima se encuentra más allá de una instrumentalización o racionalización de los potenciales terapéuticos del peyote, es decir, en la construcción de un nuevo marco que reconozca la recuperación de los conocimientos tradicionales (psicoterapéuticos) en el contexto de la globalización, de la modernidad y sus malestares.

REFERENCIAS

- ADAY, J. S., Bloesch, E. K., y Davoli, C. C. (2019). "Beyond LSD: a broader psychedelic zeitgeist during the early to mid-20th century", *Journal of Psychoactive Drugs*, 51, 210-217.
- ANDREACCHIO, A. (2013). "The role of psychoactive substances as entheogens and medicines in pre-Columbian Mexico", tesis de maestría, University College London.
- BASSET, V. (2012). "Del turismo al neochamanismo: ejemplo de la reserva natural sagrada de Wirikuta en México", *Cuicuilco*, 19(55), 245-266.
- BENCIOLINI, M. (2012). "Entre el orden y la transgresión: el consumo ritual del peyote entre coras", *Cuicuilco*, 19(53), 175-193.
- BENNETT, W. C., y Zingg, R. M. (1935). *The Tarahumara*. Chicago: University Chicago Press.
- BOGENSCHUTZ, M. P., y Johnson, M. W. (2016). "Classic hallucinogens in the treatment of addictions", *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry*, 64, 250-258.
- BYE, R. A. (1979). "Hallucinogenetic plants of the Tarahumara", *Journal of Ethnopharmacology*, 1, 23-48.
- CAROD ARTAL, F. J. (2005). "Síndromes neurológicos asociados con el consume de hongos y plantas alucinógenos", *Elementos*, 60, 49-57.
- CASSELS, B. K., y Sáez-Briones, P. (2018). "Dark classics in chemical neuroscience: mescaline", *ACS Chemical Neuroscience*, 9, 2448-2458.
- CLAVIJO GONZÁLEZ, N. (2018). "Etnobotánica de *Lophophora williamsii*", tesis de licenciatura, Universidad de Sevilla, España.

- CONTRERAS CASTILLO, A. (2021). “Iniciativa que reforma y adiciona diversas disposiciones de la Ley General de Salud, en materia de la reclasificación de enteógenos de origen natural”. *Gaceta Parlamentaria*, 5731-V. <http://gaceta.diputados.gob.mx/Gaceta/64/2021/mar/20210303-V.html#Iniciativa6>.
- DAWSON, A. S. (2018). *The peyote effect: from the Inquisition to the war of drugs*. Oakland, Cal.: University of California Press.
- DINIS-OLIVEIRA, R. J., Pereira, C. L., y Dias da Silva, D. (2019). “Pharmacokinetic and pharmacodynamic aspects of peyote and mescaline: clinical and forensic repercussions”, *Current Molecular Pharmacology*, 12, 184-194.
- EL-SEEDI, H. R., de Smet, P., Beck, O., Possnert, G., y Bruhn, J. G. (2005). “Prehistoric peyote use: alkaloid analysis and radiocarbon dating of archaeological specimens of *Lophophora* from Texas”, *Journal of Ethnopharmacology*, 101, 238-242.
- ERMAKOVA, A. (2019). “Comparative survey of *Lophophora williamsii* populations in the USA and peyote harvesting guidelines”, tesis de maestría, Imperial College London.
- FABILA, A. (1945). *La tribu kikapoo de Coahuila, México*. México: Secretaría de Educación Pública (Biblioteca Enciclopédica Popular 50).
- FEENEY, K. M. (2016). “Peyote & the Native American Church: an ethnobotanical study at the intersection of religion, medicine, market exchange, and law”, tesis doctoral, Washington State University.
- FERREIRÓS GAGO, L. (2013). “Síndromes toxicológicos”, *Revista del Hospital de Niños de Buenos Aires*, 55(248), 10-13.
- GARZA, M. de la (2012). *Sueño y éxtasis. Visión chamánica de los nahuas y los mayas*. México: FCE / UNAM.
- GEYER, M., y Vollenweider, F. (2008). “Serotonin research: contributions to understanding psychoses”, *Trends in Pharmacological Sciences*, 29(9), 445-453.
- GOTTLIEB, A. (1997). *Peyote and other psychoactive cacti*. Berkeley, Cal.: Ronin Publishing.
- GROB, C., Danforth, A., Chopra, G., Hagerty, M., McKay, C. R., Halberstadt, A. L., y Greer, G. R. (2011). “Pilot study of psilocybin treatment for anxiety in patients with advanced-stage cancer”, *Archives of General Psychiatry*, 68(1), 71-78.

- GUTIÉRREZ, A. M. (2000). “Hacia la protección oficial del peyote”, en R. Gutiérrez Nájera y M. Villalobos-Días (comps.), *Espiritualidad de los pueblos indígenas de América. Memorias del Primer Foro Internacional sobre Espiritualidad Indígena*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 334-351.
- GUTIÉRREZ DEL ÁNGEL, A. (2002). *La peregrinación a Wirikuta*. México: Conaculta / INAH.
- GUZMÁN CHÁVEZ, M. G. (2013). “Discursos, saberes y prácticas contemporáneas en torno al peyote entre no indígenas”, *Alter*, 8, 11-33.
- GUZMÁN CHÁVEZ, M. G. (2017). “Interculturalidad en torno al uso del peyote. Un patrimonio biocultural en condición de ilegalidad”, *Alteridades*, 27(53), 95-106.
- GUZMÁN CHÁVEZ, M. G. (2020). *Conservación y uso regulado del peyote en México. Estudio prospectivo de la problemática jurídica, cultural y ambiental*, México: El Colegio de San Luis.
- GUZMÁN CHÁVEZ, M. G., y Labate, B. (2019). “Reflexiones sobre la expansión y legalidad del campo peyotero en México”, *Frontera Norte*, 31, artículo 17.
- GUZMÁN CHÁVEZ, M. G., y Noyola Cherpitel, J. (2022). “Potenciales terapéuticos del peyote entre no indígenas en México”, *Revista Cultura y Droga*, 27(33), 185-200.
- HEINRICH, M., y Casselman, I. (2018). “Ethnopharmacology – From Mexican Hallucinogens to a Global Transdisciplinary Science”, en D. McKenna, G. Prance, B. De Loenen, y W. Davis (eds.), *Ethnopharmacologic search for psychoactive drugs: 50 years of research (1967-2017)*. Synergetic Press, 316-324.
- HEINRICH, M., Haller, B. F., y Leonti, M. (2014). “A perspective on natural products research and ethnopharmacology in Mexico: the eagle and the serpent on the Prickly Pear Cactus”, *Journal of Natural Products*, 77, 678-689.
- HENDRICKS, P. S., Thorne, C., Clark, C., Coombs, D. W., y Johnson, M. W. (2015). “Classic psychedelic use is associated with reduced psychological distress and suicidality in the United States adult population”, *Journal of Psychopharmacology*, 29, 280-288.

- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, S., y Sotelo Morales, J. (2013). “Argumentos para el debate sobre la legalización de la marihuana en México”, *Entreciencias*, 1(2), 169-176.
- KINDL, O. (2013). “Eficacia ritual y efectos sensibles. Exploraciones de experiencias perceptivas *wixaritari* (huicholas)”, *Revista de El Colegio de San Luis*, 3(5), 206-227.
- KREBS, T. S., y Johansen, P.-Ø. (2013). “Psychedelics and mental health: a population study”, *PLoS One*, 8(8), e63972.
- LABATE, B. C., y Feeney, K. (2016). “Paradoxes of peyote regulation in Mexico. Drug convention and environmental laws”, en B. C. Labate y C. Canvar (eds.), *Peyote. History, tradition, politics and conservation*. Santa Bárbara, Cal.: Praeger TM, 211-238.
- LAVÍN, A., y Rafael, R. (2010). “La biopiratería de los recursos de la medicina indígena tradicional en el estado Chiapas, México - El caso ICBG-Maya”, *Revista Pueblos y Fronteras Digital*, 6(10), 151-180.
- LÓPEZ SÁEZ, J. A. (2017). *Los alucinógenos*. Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
- LUNA, M. (2021). “Could synthetic mescaline protect declining peyote populations?”. https://chacruna.net/synthetic_mescaline_protect_declining_peyote_populations/.
- MCKENNA, D. J. (2004). “Clinical investigations of the therapeutic potential of ayahuasca: rationale and regulatory challenges”, *Pharmacology & Therapeutics*, 102, 111-129.
- MORALES SARABIA, A., y Ortiz Reynoso, M. (2015). “Research on psychoactive plants at Mexico’s National Medical Institute, 1888-1915”, *Circumscribere*, 16, 123-137.
- MORENO, F. A., Wiegand, C. B., Taitano, E. K., y Delgado, P. L. (2006). “Safety, tolerability, and efficacy of psilocybin in 9 patients with obsessive-compulsive disorder”, *Journal of Clinical Psychiatry*, 67(11), 1735-1740.
- MORRIS, K. (2008). “Research on psychedelics moves into the mainstream”, *The Lancet*, 371, 1491-1492.
- MUNETÁ, J. D. (2020). “Peyote crisis confronting modern indigenous peoples: the declining peyote population and a demand for conservation”, *American Indian Law Journal*, 9(1), article 6.

- NICHOLS, D. E. (2016). "Psychedelics", *Pharmacological Reviews*, 68, 264-355.
- ORTIZ MONASTERIO, A., y Mohar Acedo, M. (2021). "Análisis comparativo de posibles escenarios de regulación en torno al peyote (*Lophophora williamsii*) en México". Reporte técnico. El Colegio de San Luis.
- PALAFOX VARGAS, M. (1974). *Los huicholes a través de sus danzas*. Tepic, Nayarit: Editorial del Magisterio.
- PÉREZ MONTFORT, R. (2016). *Tolerancia y prohibiciones. Aproximaciones a la historia social y cultural de las drogas en México 1840-1940*. México: Penguin Random House Grupo Editorial.
- PETTITT SCHIEBER, B. (2012). *El "Amanecer verde": la legalización de la marihuana en Uruguay en el contexto del movimiento regional contra la prohibición*. Independent Study Project (ISP) Collection, artículo 1399.
- POSTRÁNECKÁ, Z., Vejmla, Č., y Tylš, F. (2019). "Psychedelic therapy in the Czech Republic: a theoretical concept or a realistic goal?", *Journal of Psychedelic Studies*, 3(1), 19-31.
- POWELL, P. (1984). *La guerra chichimeca (1550-1600)*. México: Fondo de Cultura Económica.
- RIBEIRO, S. (2003). "Medicina tradicional, patentes y biopiratería", *Revista Semillas*. <https://www.semillas.org.co/es/medicina-tradicional-patentes-y-biopiratera>.
- ROJAS-ARÉCHIGA, M., y Flores, J. (2016). "An overview of cacti and the controversial peyote", en B. C. Labate y C. Cavnar (eds.), *Peyote. History, tradition, politics, and conservation*. Santa Barbara, Cal.: Praeger TM, 21-42.
- ROJAS GONZÁLEZ, F. (1948). "Jículi Ba-Ba", *Revista Mexicana de Sociología*, 10(2), 167-176.
- SAHAGÚN, B. (2019). *Historia general de las cosas de Nueva España [1577]*. México: Porrúa.
- SCHAEFER, S. B. (2006). "Shamans, peyote, and coca sacraments: a path that maintains indigenous traditions and identity in a time of globalization", *Cultura y Droga*, 13, 147-168.
- SCHULTES, R. E. (1938). "The appeal of peyote (*Lophophora williamsii*) as medicine", *American Anthropologist*, 40(4), 698-715.

- SCHULTES, R. E., y Hofmann, A. (1979). *Plants of the gods: origins of hallucinogenic use*. Nueva York: McGraw-Hill.
- SEWELL, R. A., Halpern, J. H., y Pope, H. G. (2006). “Response of cluster headache to psilocybin and LSD”, *Neurology*, 66(12), 1920-1922.
- SLOTKIN, J. S. (1955). “Peyotism, 1527-1891”, *American Anthropologist*, 57(2), 202-230.
- TAYADE, S. K., Dhale, D. A., y Patil, D. A. (2013). “Psychoactive drugs of plant-origin: Lessons and potentials”, *Journal of Ethnobiology and Traditional Medicine*, 118, 340-351.
- TENORIO TAGLE, F. (2010). “Las políticas en torno a las drogas: una guerra inútil”, *Alegatos*, 76, 677-692.
- TENORIO TAGLE, F. (1991). *El control social de las drogas en México: una aproximación a las imágenes que han proyectado sus discursos*. México: Instituto Nacional de Ciencias Penales.
- TERRY, M. (2008). “The peyote trade of the Texas borderlands: religion, commerce, conservation, and drug regulation”, *Journal of Big Bend Studies*, 20, 7-18.
- TERRY, M., Steelman, K. L., Guilderson, T., Dering, P., y Rowe, M. W. (2006). “Lower Pecos and Coahuila peyote: new radiocarbon dates”, *Journal of Archaeological Science*, 33, 1017e1021.
- TERRY, M., y Trout, K. (2013). “Cultivation of peyote: a logical and practical solution to the problem of decreased availability”, *Phytologia*, 95(4), 314-320.
- TERRY, M., Trout, K., Williams, B., Herrera, T., y Fowler, N. (2012). “Limitations to natural production of *Lophophora williamsii* (Cactaceae) II. Effects of repeated harvesting at two-year intervals in a south Texas population”, *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 6(2), 567-577.
- TERRY, M., Trout, K., Williams, B., Herrera, T., y Fowler, N. (2014). “Limitations to natural production of *Lophophora williamsii* (Cactaceae) III. Effects of repeated harvesting at two-year intervals for six years in a South Texas (U.S.A.) population”, *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 8(2), 541-550.
- THOMPSON, C., y Szabo, A. (2020). “Psychedelics as a novel approach to treating autoimmune conditions”, *Immunology Letters*, 228, 45-54.

- TUPPER, K. W., Wood, E., Yensen, R., y Johnson, M. W. (2015). "Psychedelic medicine: a re-emerging therapeutic paradigm", *Canadian Medical Association Journal*, 187(14), 1054-1059.
- TYLŠ, F., Páleníček, T., y Horáček, J. (2014). "Psilocybin - Summary of knowledge and new perspectives", *European Neuropsychopharmacology*, 24(3), 342-356.
- UJVÁRY, I. (2014). "Psychoactive natural products: overview of recent developments", *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità*, 50(1), 12-27.
- UNODC (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito) (2018). *Terminología e información sobre drogas*. Nueva York: Naciones Unidas.
- VALDÉS, C. (1995). *La gente del mezquite. Los nómadas del noreste en la colonia*. Coahuila. México: Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social.
- VIKTORINOVÁ, M., y Tylš, F. (2016). "Unconscious processes of human mind: insights from psychedelic research", *Psychiatrie*, 20(2), 100-107.
- WINKELMAN, M. (2014). "Psychedelics as medicines for substance abuse rehabilitation: evaluating treatments with LSD, peyote, ibogaine and ayahuasca", *Current Drug Abuse Reviews*, 7, 101-116.
- WINKELMAN, M., y Roberts, T. B. (2007). *Psychedelic medicine: new evidence for hallucinogenic substances as treatments*. Westport, PC: Praeger / Greenwood.
- YENSEN, R. (1996). "From shamans and mystics to scientists and psychotherapists: interdisciplinary perspectives on the interaction of psychedelics drugs and human consciousness", en M. Winkelman y W. Andritzky (eds.), *Yearbook of cross-cultural medicine and psychotherapy 1995*. Berlín: Verland und Vertrieb, 109-128.

CAPÍTULO 6

LA IMPORTANCIA DE LOS INSECTOS Y OTROS ARTRÓPODOS EN EL CONOCIMIENTO TRADICIONAL DE LAS ZONAS ÁRIDAS

ALFREDO RAMÍREZ-HERNÁNDEZ¹

ALETHIA MUÑIZ-RAMÍREZ²

JOYCE TRUJILLO

FRANCISCO ORTIZ

RESUMEN

Los artrópodos son uno de los grupos de animales más diversos, entre los que destacan los insectos. Estos invertebrados han estado presentes en la Tierra desde hace miles de años, por lo que se ha entrelazado una amplia gama de interacciones con el humano, siendo contemplados como deidad, vistos como fuente de alimento, inspiración en las artes o usados para extraer tinturas. En este capítulo se pone de manifiesto la relevancia de esta entomofauna para las culturas que se han gestado en las zonas áridas, así como la importancia de reconocer y conservar éticamente este conocimiento tradicional que es parte de nuestro patrimonio cultural. Gracias a este saber tradicional heredado sobre el uso de los insectos y otros artrópodos, se ha promovido la innovación tecnológica en la industria alimentaria, textil y agrícola, desde la cría de insectos para extracción de pigmentos, control de plagas, su uso como alimento por ser una excelente fuente proteica y de metabolitos secundarios con

¹ CONAHCYT / Ipcyt-División de Ciencias Ambientales. Camino a la Presa San José 2055. Col. Lomas 4.^a sección. C.P. 78216. San Luis Potosí, S.L.P., México. Autor para la correspondencia: alfredo.ramirez@ipicyt.edu.mx.

² CONAHCYT / Ipcyt-División de Materiales Avanzados. Camino a la Presa San José 2055. Col. Lomas 4.^a sección. C.P. 78216. San Luis Potosí S.L.P. México.

actividades biológicas diversas, así como el uso de insectos o sus compuestos bioactivos con efectos sobre la salud humana.

PALABRAS CLAVE: entomofauna, seguridad alimentaria, innovación tecnológica, desiertos, actividad biológica.

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, los humanos nos hemos beneficiado de los insectos de manera directa o indirecta gracias a las funciones que éstos desempeñan tanto en los ecosistemas naturales como en los sistemas productivos; por ejemplo, polinización, control biológico de plagas o degradación de la materia orgánica, entre otras (Losey y Vaughan, 2006). Estas funciones aportan múltiples beneficios a la sociedad al ser generadores de varios servicios ecosistémicos (abastecimiento, regulación, soporte y cultural) (Dangles y Casas, 2019; Noriega *et al.*, 2018). Además, por medio de ellos se pueden obtener diversos productos, como tintes para la fabricación de telas y alimentos, por su valor nutricional, medicinal, etc. (e.g., Dossey, 2010; Kampmeier e Irwin, 2009; Mézes, 2018).

En la actualidad, con la globalización, el incremento en los movimientos migratorios de las poblaciones humanas y el latente riesgo de las pandemias, debemos garantizar una alimentación saludable, suficiente y equilibrada que contribuya al bienestar humano. De acuerdo con la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), para el año 2050 se espera un incremento del 75% en la producción de alimentos en el mundo para alimentar una población creciente (FAO, 2017). El aumento de la población, la desigualdad económica y la creciente urbanización han cambiado los patrones de consumo y las preferencias alimentarias, lo que ha llevado a una mayor demanda de proteínas animales. Este contexto ejerce una fuerte presión sobre los recursos ya limitados, agrava la competencia por la tierra para producir alimentos, piensos y combustibles, y hace que el desafío de la sostenibilidad ambiental sea aún más difícil. Sin embargo, en varias partes del mundo existen tendencias de retomar dietas tradicionales a base de insectos y otros artrópodos, que pueden diversificar las dietas actuales, mejorar los medios de vida, contribuir a la seguridad alimentaria y tener una huella ecológica menor en comparación con otras fuentes de proteínas (FAO, 2021). Se sabe que desde tiempos antiguos este tipo de alimentación es aceptada y se incluye en algunas regiones en diferentes partes del mundo y de México (Fleta, 2018). En la actualidad en nuestro país, la alimentación de los pueblos originarios ha desencadenado múltiples estudios sobre el uso de la dieta tradicional mexicana y sus beneficios saludables,

asociado al contenido nutricional del maíz, frijol y pulque, y fuentes de proteína animal, como los insectos (Valerino-Perea *et al.*, 2019; 2020).

El consumo de proteína animal proveniente de los insectos no fue considerado importante en épocas de la Conquista y mucho menos como una práctica que incentivar (Aguilar-Rodríguez, 2019). En 2013, la FAO emitió un informe en que subrayaba la importancia de incluir a los insectos como parte de la dieta diaria de la población mundial por ser una fuente de proteína de bajo costo de producción y ambientalmente amigable, que incidía en la hambruna que sufren en algunos países (Van Huis *et al.*, 2013). Sin embargo, dicha noticia causó cierta controversia, principalmente en países occidentales donde la ingesta de insectos no forma parte de su tradición. No obstante, la realidad es que todos estamos relacionados con los insectos o productos derivados de ellos, y, sin saberlo, hemos consumido insectos de alguna manera. Por ejemplo, en el yogurt de fresa, su color característico se debe al colorante carmín que es extraído de la grana cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa), en forma de ácido carmínico, como discutimos más adelante. La grana cochinilla es un insecto del orden *Hemiptera* que se desarrolla sobre los cladodios de los nopales (*Opuntia* spp.), y es empleado como colorante natural no sólo en productos alimenticios, sino también en la industria textil.

El objetivo de este capítulo es recopilar información relacionada con el uso tradicional de los insectos y cómo este conocimiento ha dado pie al desarrollo de nuevas tecnologías innovadoras para la generación de súper alimentos y otros productos. Debido a su gran diversidad de formas y elevado número de especies, en este capítulo, como primer punto, abordaremos aspectos generales sobre la morfología e importancia de los insectos en términos de biodiversidad, con la finalidad de brindar al lector un panorama amplio de la complejidad de este grupo de animales invertebrados. Además, se pone énfasis en los principales usos biotecnológicos y de alimentación de los insectos de forma tradicional y actual.

¿QUÉ SON LOS INSECTOS? CARACTERÍSTICAS GENERALES

Los artrópodos (*Arthropoda*; del latín ‘pie articulado’) son los organismos en los que menos pensamos al momento de escuchar la palabra *animal*.

No obstante, este grupo de metazoarios se conforma por la mayor proporción de especies conocidas en el planeta (cerca del 80%) (figura 1), que incluye a los quelicerados, miriápodos, crustáceos y hexápodos; dentro de este último, se encuentran los insectos (clase *Insecta*; latín, ‘cortado’) y grupos emparentados, como los colémbolos, proturos y dipluros.

FIGURA 1

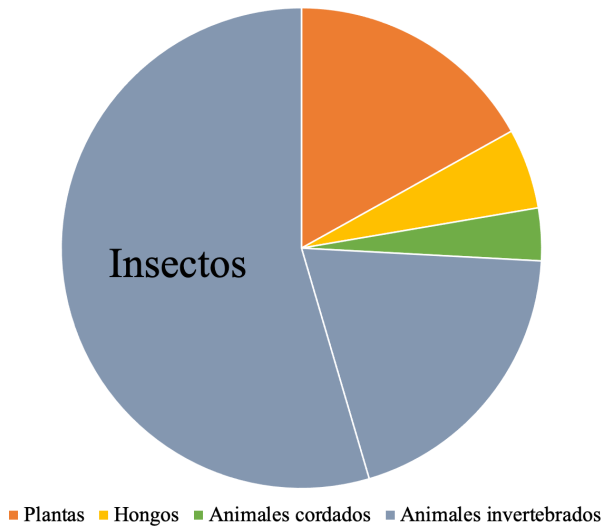


Gráfico circular que muestra el porcentaje de especies descritas por cada grupo de organismos en la Tierra, donde los invertebrados destacan en general y la clase insecta en particular.

Fuente: Chapman (2009).

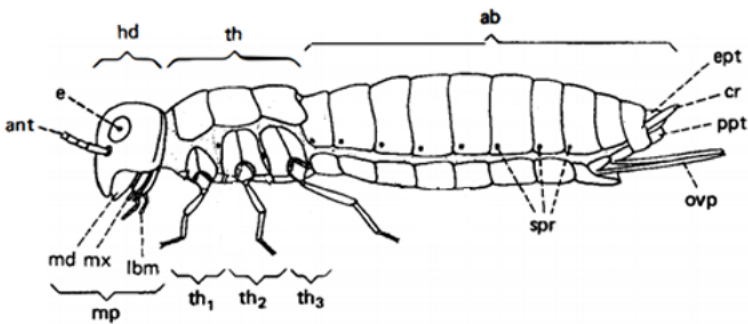
Los insectos son un grupo muy exitoso que consta de un gran número de especies (más de un millón descritas), y los secretos de su éxito van en relación con características morfológicas como su cutícula rígida y flexible a base de quitina, que protege al organismo del medio externo (frente a depredadores y de la deshidratación), la presencia de apéndices que facilitan el vuelo (característica única entre los artrópodos), su tamaño pequeño y alta tasa de reproducción. En conjunto, estas ventajas han hecho posible su adaptación a los distintos ecosistemas que ofrece nuestro planeta (con excepción de los casquetes polares).

La importancia de los insectos y otros artrópodos en el conocimiento tradicional...

Anatomía de los insectos

Morfológicamente, los insectos adultos mantienen un patrón de organización corporal común, el cual que consiste en tres tagmas o segmentos (regiones compuestas por la fusión de metámeros): 1) la cabeza, donde se engloban los ojos (fotorreceptores), antenas (quimiorreceptores) y piezas bucales (facilitan la alimentación); 2) el tórax, subdividido en tres regiones (protórax, mesotórax y metatórax), por las cuales encontraremos los apéndices que faciliten su movimiento, tanto en tierra, agua como en el aire; y 3) el abdomen, la región que cuenta con los órganos reproductores y prolongaciones conocidas como cercos (figura 2).

FIGURA 2



Modelo anatómico general de un insecto. ab, abdomen; cr, cerco; ept, epiprocto; ovp, ovipositor; ppt, paraprocto; spr, espiráculos. hd, cabeza; ant, antena; e, ojo compuesto; lbn, labio; Maryland, mandíbula; mp, piezas bucales; mx, maxilar. th, tórax; th1, protórax; th2, mesotórax; th3, metatórax. Fuente: Triplehorn y Johnson, (2005).

Si hacemos una inspección detenida en la cabeza, al igual que en los otros tagmas, podemos encontrar una gran variedad de arreglos espaciales de las estructuras ya mencionadas, y esto dependerá del orden taxonómico al que nos refiramos; por ejemplo, cucarachas y avispas no tienen el mismo arreglo que una mantis o una mariposa. Sin embargo, una buena proporción de especies mantendrán los mismos elementos, es decir, tendrán ocelos, que marcan la presencia de luz y oscuridad, junto a ojos compuestos, que le permitirán al animal tener una imagen de su contexto.

Por otro lado, encontraremos también las antenas (con una amplia variedad de formas), las cuales guiarán a los organismos por quimiotáxia positiva hacia algún alimento, o a las feromonas secretadas por una pareja potencial; asimismo, puede ser negativa y alejarlos de un sitio de peligro o de algún depredador.

Finalmente, podemos hablar de las piezas bucales, las cuales mantienen el mismo tipo de piezas (labro, maxila, mandíbula y labio), pero que por evolución han cambiado en formas distintas, en otras palabras, tenemos aparatos bucales mandibulados (anhaustelado) y chupadores (haustelado), lo cual ha favorecido la adaptación a un gran número de gremios alimenticios, que se pueden resumir a grandes rasgos, como herbívoros (por ej., folívoros, polinívoros, nectarívoros, frugívoros, etc.), carnívoros (hematófagos) y detritívoros (coprófagos, saproxílicos, necrófagos, etcétera).

En el caso del tórax, encontraremos los apéndices implicados directamente en la locomoción (patas y alas); en el caso de las patas, localizamos un par por cada subdivisión (compuestas por seis artejos) y en el caso de las alas un par en el meso y metatórax. Si se pone atención en estas estructuras, podremos notar que para cada orden taxonómico existen ligeras variaciones, lo cual se encuentra en relación con el estilo de vida que lleve el organismo. Por ejemplo, algunos constan de patas excavadoras que les facilitan enterrarse en el sustrato y cavar a través de él; patas marchadoras que les ayudan a mantener un movimiento sobre las superficies; patas saltadoras que acumulan energía mecánica, que les facilitará desplazarse a grandes distancias, por cuestiones de forrajeo o en huida frente a algún depredador; patas nadadoras que cumplen la función de un remo de balsa, y patas raptoras que facilitan a ciertos insectos la captura e inmovilización de una presa, mientras éste se alimenta de ella.

Además, en casos especiales podremos identificar estructuras especializadas para la captación (tímpano) y emisión de sonidos (estridulación), herramienta útil para la comunicación. De manera similar, las alas tendrán una gran variación morfológica, pues hay alas membranosas, recubiertas con escamas o filamentos plumosos, semi y esclerotizadas (hemielitros y élitros, respectivamente), hasta modificadas a balancines (halterios) que favorecen el planeo y control sobre el vuelo.

La importancia de los insectos y otros artrópodos en el conocimiento tradicional...

En cambio, para el abdomen detectaremos los órganos y estructuras implicadas en la reproducción (genitalia masculina = estructuras involucradas en la cópula y en la transferencia de esperma, y la genitalia femenina, involucrada en la puesta de huevos sobre sustratos adecuados), digestión, excreción e intercambio gaseoso (espiráculos), comprendida por lo general en once segmentos.

Tipos de insectos

Nos encontramos rodeados por una gran variedad de insectos, pero no todos son los mismos, pues a lo largo del tiempo la descripción de cada especie ha facilitado categorizarlos en grupos que comparten ciertas generalidades, como aspectos sobre su ciclo de vida, gremios alimentarios, morfológicos y etológicos. Dentro de las categorías taxonómicas, aquella que nos permite identificar estos aspectos es el “orden”, y en la división de los insectos encontramos enlistados tradicionalmente treinta de ellos (cuadro 1).

CUADRO 1
ÓRDENES TAXONÓMICOS DE LOS INSECTOS (CLASE *INSECTA*)

Apterigota
Archaeognatha (Lepismas)
Thysanura (Pececillos de plata)
Pterigota
Blattodea (Cucarachas)
Coleoptera (Escarabajos)
Dermaptera (Tijerillas)
Diptera (Moscas)
Embioptera
Ephemeroptera
Grylloblattodea
Hemiptera (Chinches, cicadas y pulgones)
Hymenoptera (Abejas, avispas y hormigas)
Isoptera (Termitas)

CUADRO 1

ÓRDENES TAXONÓMICOS DE LOS INSECTOS (CLASE *INSECTA*) (continuación)

Lepidoptera (Mariposas, polillas y esfinges)
Mantoidea (Mantis)
Mantophasmatodea
Mecoptera (Moscas escorpión)
Megaloptera
Neuroptera
Odonata (libélulas y caballitos del diablo)
Orthoptera (saltamontes y grillos)
Phasmatodea (Insectos palo)
Phthiraptera (Piojos)
Plecoptera (Moscas de la roca)
Psocoptera (Psócidos)
Raphidioptera
Siphonaptera (Pulgas)
Strepsiptera
Thysanoptera (trips)
Trichoptera (Farigáneas)
Zoraptera

En negritas, se muestran las dos subclases. Fuente: Triplehorn y Johnson (2005).

Cada uno de ellos lleva a cabo distintos roles en el ecosistema. Por ejemplo, en las zonas áridas ofrecen distintas funciones ecosistémicas, como la polinización por parte de abejas y mariposas, que es vital para la producción de frutos como pitahayas y garambullos; o el control de plagas, como lo hacen algunos escarabajos y tisanópteros contra el ataque de áfidos. Algunos otros pueden causar grandes estragos convirtiéndose en plagas agrícolas y forestales; por ejemplo, la chicharrita de la remolacha (*Circulifer tenellus* (Baker)) causa daños a especies de plantas pertenecientes a las familias *Aizoaceae*, *Chenopodiaceae* y otras plantas adaptadas a zonas áridas (Ruiz *et al.*, 2013). Asimismo, algunas especies de insectos se pueden comportar como vectores de enfermedades, como el caso de algunos miembros del orden *Diptera* (mosquitos) e incluso infestan nuestros hogares, como lo son las termitas, pulgas, cucarachas,

piojos y algunas chinches. Por tal motivo, su conocimiento nos facilitará su manejo, control o aprovechamiento.

Los insectos y su relación con el humano

Los insectos son tan diversos y abundantes como fascinantes; tanto, que es imposible no notarlos. Han poblado la Tierra desde hace millones de años y su relación con el humano ha sido inevitable. De acuerdo con Hogue (1987), los humanos gastan sus energías intelectuales en tres áreas básicas de actividad: 1) sobrevivir, utilizando el aprendizaje práctico (aplicación de la tecnología); 2) buscar conocimiento puro mediante procesos mentales inductivos (ciencia); y 3) la búsqueda de la iluminación del gusto y el placer mediante ejercicios estéticos (humanidades).

Gracias a la contemplación de la naturaleza, los humanos han quedado seducidos por los insectos a lo largo de la historia, y éstos han llegado a ocupar un papel tan relevante para las distintas civilizaciones que han poblado nuestro planeta. Por ejemplo, los antiguos egipcios veneraban al escarabajo estercolero, pues era la representación del dios Khepri (dios del Sol). Asimismo, en México, recientemente fue descubierto el escarabajo estercolero *Canthon cyanellus* en ofrendas relacionadas con el Mictlán encontrado en el Templo Mayor de la antigua ciudad de Tenochtitlán (comentarios personales del Dr. Mario Favila).

Por otra parte, los insectos han estado presentes en las artes mayores (así como en las artes aplicadas o artes menores) y se hallan plasmados en la arquitectura de distintas ciudades, la literatura, la danza, el cine, la música, etc. (Blas y del Hoyo, 2013). Como ejemplo de un insecto muy carismático que ha quedado grabado en la memoria de todos los mexicanos tenemos a Cri-Cri (el Grillo Cantor), creado por Francisco Gabilondo Soler en 1924 y que fue el personaje principal de las canciones del mundo de Soler.

En la cultura mexicana, los insectos han sido foco de atención desde la época prehispánica. Como evidencia, podemos encontrar varias palabras que forman parte de nuestro vocabulario habitual y que hacen alusión a los insectos, como mencionan Zaragoza-Caballero *et al.* (2017): Azcapotzalco, que significa 'en los hormigueros' y proviene de

azcaputzal-co de *azcapotzalli* = ‘hormiguero’, y *co* = ‘lugar’; Chapultepec significa ‘en el cerro de los chapulines’, de *Chapul-tepe-c*, de *Chapulín* = ‘chapulín’ y *tépetl* = ‘cerro’; escamoles, ‘hormiga alimento’, de *azcamolli*, que deriva de *ázcalt* y *molli*.

Quizá pocos lo hemos logrado apreciar, pero los insectos han liderado cambios en el arte, la moda y otros aspectos culturales. Por ejemplo, desde épocas prehispánicas, los insectos han estado presentes en la moda con la elaboración del colorante carmín (también conocido como rojo mexicano) que es extraído de las hembras grávidas de la grana cochinilla (*Dactylopius coccus*); este colorante también se ha usado en la industria textil hasta nuestros días.

A pesar de que *D. coccus* era cultivado y aprovechado desde México hasta Guatemala, la variedad de cochinilla más valiosa e importante durante la colonia española fue la domesticada y cultivada en México, conocida como grana fina (usada hasta nuestros días), que tiene el doble de tamaño y produce un tinte mucho más rico (Salinas, 2018). De acuerdo con fray Bernardino de Sahagún (1957 [1577]), los campesinos mexicanos desarrollaron un patrón complejo de cultivo del nopal que proporcionó el sustento esencial al valioso insecto productor de tinte. La producción del tinte se convirtió pronto en una actividad de gran importancia económica en la Nueva España, e incluso llegó a ser la actividad principal en lugares donde no podía realizarse la minería (Coll-Hurtado, 1998).

En la actualidad, el carmín también se emplea en la industria cosmética y alimentaria como colorante natural de alimentos (Jongema, 2017; Van Huis *et al.*, 2013), con la finalidad de dar una mejor apariencia y sustituir el uso de los colorantes sintéticos a base de petróleo que inclusive pueden causar daños a la salud (Figuroa *et al.*, 2016; González *et al.*, 2002). Asimismo, el carmín cuenta con otras funciones biológicas, asociadas a sus metabolitos secundarios, como se detalla más adelante.

Además de usar el carmín para teñir, los diseñadores han tratado de emular los maravillosos tonos brillosos que presentan algunos insectos. Algunos élitros (segundo par de alas endurecidas) de los coleópteros de la familia *Buprestidae* han sido utilizados para fabricar joyería artesanal, así como la obtención de seda a partir del gusano de seda (*Bombyx mori*).

Recientemente se han empleado cultivos intensivos de grillos domésticos (*Acheta domesticus*), que son usados en alimentos para mascotas y

cebo de pesca (Morales-Ramos *et al.*, 2020). Un punto relevante en el uso de insectos es la obtención de productos de mayor valor comercial, alimentos enriquecidos, con gran calidad nutricional y que otorgue efectos funcionales, así como reducir el impacto ambiental para su producción.

Ingesta de insectos

La antropointomofagia se refiere a la ingesta de insectos por el ser humano, según la FAO (2021), aproximadamente 2 111 especies de insectos se consumen en 140 países; existe entomofagia documentada en todo el mundo (Asia, Australia, África y América). En México, se describió desde el Código Florentino del siglo XVI, donde se menciona que existían 96 especies diferentes en la dieta mesoamericana (Van Huis *et al.*, 2013), mientras que actualmente se han descrito 596 especies endémicas que con toda probabilidad son consumidas. En la figura 3 se muestran los estados y la cantidad de especies consumidas en promedio (Naturalista, 2021; Ramos-Elorduy, 2004).

Mundialmente, se han descrito sólo algunas de las especies de insectos más comunes que se consumen, incluidos grupos de *Coleoptera* (468 especies), *Hemiptera* (102 especies), *Lepidoptera* (253 especies), *Diptera* (34 especies), *Hymenoptera* (351 especies), *Orthoptera* (267 especies), *Odonata* (29 especies); de estos insectos, se ha reportado el consumo de escarabajos, orugas, gusanos, abejas, avispas, hormigas, grillos, saltamontes, langostas, termitas, libélulas, moscas, entre otros, en sus múltiples etapas (huevos, larvas, pupas, ninfas y adultos) (Jongema, 2017; Viesca *et al.*, 2009).

En la actualidad, se estima que el 92% de las especies que se consumen se obtienen mediante recolección en la naturaleza (88% son de origen terrestre y 12% se obtienen de ecosistemas acuáticos), el 6% son insectos semidomesticados y 2% son insectos cultivables (FAO, 2021). Se estima que en 2023 el mercado de los insectos podría generar 250 millones de dólares en América Latina; mientras que en Asia se estima en 477 millones (Van Huis *et al.*, 2013).

En México, los insectos han formado parte de la dieta tradicional de varios pueblos originarios, incluyendo formas tradicionales de recolección, preparación, almacenamiento y consumo; por tanto, los insectos

FIGURA 3



Mapa representativo de cantidad de especies consumidas por estado; rosa pálido representa un consumo menor a 24 especies, rosa representa un consumo en esas regiones de 25-49 especies, azul pálido representa un consumo de 50-99 especies, verde representa un consumo de 100-149 especies y morado representa un consumo mayor a 150 especies. Imágenes representativas de los insectos mayormente consumidos por estado y los puntos dorados representan las zonas áridas y semiáridas de México.

Fuente: Elaboración propia a partir de Cruz y Peniche (2018) y Ramos-Elorduy (2004).

formaban parte de sus sistemas alimentarios tradicionales, aunado a significados místicos, mágicos, tributarios y religiosos, además de usos medicinales, por sus propiedades singulares (como afrodisiacos), y como modelos artesanales o de comportamiento (López-Gómez *et al.*, 2013; Ramos-Elorduy, 2009).

Hoy en día, la entomofagia sobrevive como una práctica común a través de los pueblos originarios y poblaciones rurales del país (Ramos-Elorduy, 2009). Se ha descrito que los insectos comestibles son consumidos por 36 etnias mexicanas, donde destacan nahuas, otomíes, zapotecos, mixtecos, mayas, totonacas, mazahuas, mixes, tepehuanes, lacandones,

matlazincas, amuzgos, triques y chontales, entre otras (Ramos-Elorduy, 2004; Ramos-Elorduy y Pino-Moreno, 1989).

Cabe señalar que el consumo de insectos puede ser muy variado con respecto al orden, entre las etnias mencionadas, o bien algunos órdenes no se consumen entre algunas etnias. No obstante, se debe puntualizar que es difícil limitar el estudio de los insectos comestibles a su uso tradicional, ya que este conocimiento y prácticas tradicionales están desapareciendo rápidamente, derivado de la globalización. Por tanto, también se relaciona con una transición nutricional (Capper, 2013; Cruz y Peniche, 2018).

En nuestro país, en 2002 se describió el empleo de algunos insectos endémicos como *Coleoptera* (119 especies), *Hemiptera* (90 especies), *Lepidoptera* (45 especies), *Diptera* (15 especies), *Hymenoptera* (101 especies), *Orthoptera* (78 especies), *Odonata* (6 especies), entre otros (Cruz y Peniche, 2018), principalmente en la región norte de México, la cual representa gran parte del desierto mexicano (Baja California, Sonora, Durango, Chihuahua, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila). Como lo muestra la figura 3, los principales insectos comestibles y con mayor cantidad de estudios son:

1. Escarabajos, particularmente la gallina ciega proveniente de los géneros *Cerambycidae*, *Scarabaeidae*, *Melolonthidae* y *Passalidae*, consumidos en su mayoría asados o fritos en Hidalgo, Oaxaca y el Estado de México, entre otros (Ramos-Elorduy y Pino-Moreno, 2004).
2. Gusano de maguey (*Aegiale hesperiaris* e *Hypopta agavis*), empleados en el mezcal, sal, salsas y fritos en los estados de Oaxaca, San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Hidalgo y Estado de México, siendo abundantes de diciembre a marzo y de septiembre a octubre, con un costo por kilogramo de 4 500 pesos mexicanos (Luna-Valadez *et al.*, 2013).
3. Gusano de chile o “chinicuil” (*Comadia redtenbacheri* y *Scyphophorus acupunctatus*), su empleo se ha reportado en el Estado de México, Hidalgo y Oaxaca, entre otros, ya sea fritos o en sal o salsas (Castro-Torres y Lalnderal-Cázares, 2016).
4. Escamoles u hormiga güijera (*Liometopum apiculatum*), su consumo se da en forma de larva y es uno de los insectos más

apreciados por su sabor y ganancias económicas, que genera 2 000 pesos mexicanos por kilo. Se produce principalmente en el Estado de México, San Luis Potosí, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León y Puebla; se recolectan de la naturaleza en nidos de marzo a abril (Lara-Juárez *et al.*, 2015).

5. Jumiles o chinches de monte (*Euschistus taxcoensis*, *Atizies taxcoensis* y *Edessa* sp.), su empleo se ha reportado en salsas y fritos en tacos en el Estado de México, Hidalgo y Oaxaca, entre otros (Ramos-Elordury y Pino, 2003).
6. Hormigas chicatanas o voladora (*Atta mexicana*), su consumo se ha descrito en Puebla, Oaxaca e Hidalgo, entre otros, y su presencia se encuentra a lo largo de México, incluidos estados con gran cantidad de tierras secas, como Sonora y Nuevo León (Infante-Rodríguez *et al.*, 2020; Naturalista, 2021).
7. Ahuautle: chinche acuática (*Corisella mercenaria*, *Corisella texcocana*, *Krizousacorixa femorata*, *Krizousacorixa azteca*, *Graptocorixa abdominalis*, *Graptocorixa bimaculata*), se emplean con huevo, tamales y mixiotes; se han descrito en el Estado de México y Puebla (Ramos-Elordury y Pino, 2003).
8. Cochinilla de la grana (*Dactylopius coecus*, *D. tomentoslis*, *O. indicus* y *D. confusus*), se han descrito en Oaxaca, Hidalgo y Estado de México (Ramos-Elordury, 2009).
9. Chapulines de la milpa (*Sphenarium purpurascens*, *Acrididae* y *Romaleidae*), los cuales han generado la instalación de granjas debido a la diversidad de su uso en forma de asados, fritos, tostados, harinas, salsas, cebo de pesca y fuente de proteína para la elaboración de comida para mascotas (Morales-Ramos *et al.*, 2020; Rodríguez-Miranda *et al.*, 2019).

A este respecto del uso de insectos en la alimentación y la gastronomía de muchos países del mundo, México no es la excepción, pues incluye una amplia variedad de platillos elaborados con insectos. Por sólo citar unos ejemplos, en nuestro país un platillo representativo son los escamoles, que son los huevecillos de la hormiga *Liometopum apiculatum*; este exótico platillo puede alcanzar precios muy elevados.

Asimismo, en algunas poblaciones se pueden consumir salsas elaboradas con el abdomen de la hormiga chicatana (*Atta mexicana*) o jumiles (hemípteros de la familia, *Pentatomidae*), saltamontes fritos con guacamole, chocolate con grillos, pasteles de huevos de insecto de las cañas, saltamontes marinados con limón, sal y chiles y tortilla con chinicuiles, entre otros (Fleta, 2018).

Valor nutricional de los insectos

La importancia del valor nutricional radica en varios puntos relevantes para la población del mundo, así como en las tierras áridas y semiáridas, como son el crecimiento demográfico, la urbanización, el crecimiento de la clase media, la malnutrición, el fin de proporcionar seguridad alimentaria.

La composición nutricional entre las diferentes especies de insectos comestibles es muy variada, y ésta depende de algunos factores como la calidad de sus sustratos, la etapa de desarrollo y factores ambientales, que pueden afectar el contenido de nutrientes de los insectos comestibles (FAO, 2021).

Se ha descrito en varias ocasiones la composición nutricional de insectos comestibles (Fleta, 2018; Raheem *et al.*, 2019; Rumpold y Schlüter, 2013; Van Huis *et al.*, 2013), y se resalta que son ricos en proteínas, aminoácidos esenciales, fibra dietética, ácidos grasos; además, son buenas fuentes de micronutrientes como hierro, zinc, magnesio, manganeso, fósforo, selenio, zinc, riboflavina, ácido pantoténico, biotina, ácido fólico, ácido ascórbico y retinol, lo que hace que estos productos sean considerados como súper alimentos, caracterizados por ser alimentos funcionales derivados de un excelente valor nutrimental (por ejemplo: proteínas, antioxidantes, fibra, prebióticos o probióticos); con efectos positivos en la salud humana asociados a la composición química y la naturaleza de los súper alimentos en comparación con otros alimentos (FAO, 2021; Raheem *et al.*, 2019). No obstante, en la actualidad no hay información suficiente sobre la disponibilidad de estos micronutrientes en el ser humano.

Aunado al gran contenido de metabolitos secundarios, producidos por bacterias, hongos o plantas, los cuales no están directamente involucrados en el crecimiento, desarrollo o reproducción del organismo, éstos

son relevantes en los insectos, por lo que serán detallados a continuación, así como las propiedades que poseen (FAO, 2021; Fleta, 2018; Raheem *et al.*, 2019; Ramos-Elorduy y Pino-Moreno, 2001).

METABOLITOS SECUNDARIOS CON ACTIVIDADES BIOLÓGICAS DIVERSAS

Desde el origen del ser humano, éste tuvo que aprender a curarse para buscar su bienestar, utilizando de manera empírica, y a base de prueba y error, lo que pudiese encontrar en su entorno, como plantas, insectos, hongos, etc. Con el tiempo, este conocimiento fue transmitido de generación en generación, y así llegó hasta nuestros días.

Hoy en día se sabe que la acción benéfica de ciertos insectos se debe a la presencia de determinados metabolitos secundarios, los cuales son moléculas orgánicas que no son vitales en los procesos biológicos, pero pueden presentar un efecto benéfico al ser utilizadas en ciertas afecciones o padecimientos.

Arañas y escorpiones

Los arácnidos tienen importancia médica; sin embargo, existe poco conocimiento al respecto. Los alacranes son un grupo de arácnidos que pertenecen al orden *Scorpiones*, y se encuentran presentes en la mayor parte del mundo (Ponce-Saavedra *et al.*, 2016). Los microorganismos resistentes a antibióticos han traído como consecuencia que las infecciones bacterianas sean cada vez más difíciles de tratar con los antibióticos actuales. Es por ello que la resistencia a los antibióticos ha motivado investigaciones enfocadas en el descubrimiento de nuevos fármacos para el control de enfermedades bacterianas, obtenidos de nuevas fuentes no tradicionales; por ejemplo, venenos de insectos.

En este sentido, los péptidos antimicrobianos (PA) se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza. Los PA son moléculas pequeñas, las cuales presentan residuos de aminoácidos; éstos, en algunas especies, sirven como el principal mecanismo de defensa antimicrobiano

(García *et al.*, 2013). Está documentado que los venenos de las arañas y escorpiones contienen PA y que la actividad antibacteriana de estos PA probablemente tiene la función de un antibiótico, el cual es útil para la araña o el escorpión para limpiar sus conductos biológicos que llevan el veneno desde la glándula del veneno hasta la punta del aguijón del escorpión o hasta los colmillos (quelíceros) de la araña (Corzo *et al.*, 2002).

En este sentido, García *et al.* (2013) aislaron dos PA llamados La47 y Css54, los cuales se obtuvieron de la araña *Lachesana* sp. y del escorpión *Centruroides suffusus suffusus*, respectivamente. Estos PA presentaron características hidrófobas, las cuales están asociadas con su actividad citotrófica. Ambos péptidos inhibieron el crecimiento de *E. coli* y *S. aureus*; sin embargo, únicamente Css54 fue hemolítico. Al combinar estos PA con antibióticos comerciales, se observó un aumento significativo en la inhibición del crecimiento bacteriano (García *et al.*, 2013). El veneno de escorpión es una fuente potencial para descubrir nuevas moléculas con propiedades terapéuticas, ya que se ha reportado que el veneno presenta compuestos con actividad farmacológica diversa, como antimicrobianos, insecticidas, antiepilépticos, antiartríticos, entre otros (Alonso-Castro *et al.*, 2011; Valdez-Velázquez *et al.*, 2016).

Plagas con actividad biológica diversa

Algunos artrópodos son considerados plagas y propician grandes pérdidas en los agrosistemas debido a que pueden alimentarse de aproximadamente 400 especies de plantas, siendo los cultivos más afectados el maíz, soja, frijol, sésamo, sorgo, cacahuate, algodón, agave, caña de azúcar, plátano, diferentes árboles frutales y arroz (Díaz-Sánchez *et al.*, 2015).

Tomando en cuenta lo anterior, en los últimos años se ha destacado el uso de artrópodos como reservorios de compuestos bioactivos (Torres-Castillo *et al.*, 2018).

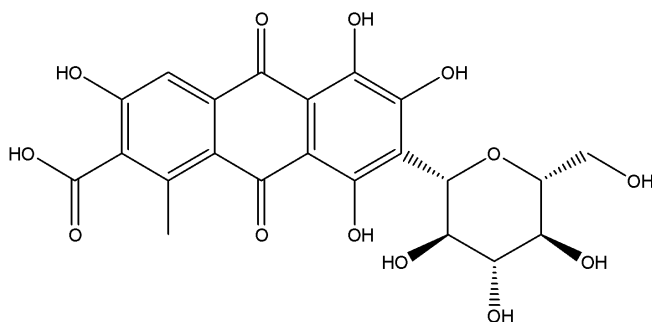
Pérez-Ramírez *et al.* (2019) analizaron los metabolitos secundarios presentes en la langosta centroamericana *Schistocerca piceifrons* (Orthoptera: Acrididae), la cual es una de las plagas más importantes en México y Centroamérica. Es un insecto polífago que causa grandes daños económicos a cultivos agrícolas, y se ha encontrado que contiene compuestos

fenólicos, alcaloides, taninos, flavonoides, esteroides y antioxidantes, además de quitina y quitosano (Torres-Castillo *et al.*, 2018).

Las chinches del mezquite (*Thasus gigas*) son una especie de insectos que se pueden encontrar en zonas semiáridas; viven en los mezquites, se alimentan de hojas tiernas y tallos verdes. Tradicionalmente, las ninfas (estado juvenil), aunque son originarias de zonas áridas, se consumen como parte de la dieta en la Huasteca de Hidalgo, México. Se ha reportado que estos insectos aportan el 6% de ácidos grasos poliinsaturados y del 19 al 23% de grasa, dependiendo de su estado de desarrollo, por lo que se ha documentado que al consumir las chinches del mezquite se reduce la concentración de colesterol, además de reducir el riesgo de padecer aterosclerosis y reducir los niveles de glucosa en sangre (Montse-rrat *et al.*, 2013).

Cochinilla. El insecto *Dactylopius coccus* produce un colorante comúnmente conocido como “grana cochinilla” o carmín de cochinilla. El componente principal de este pigmento es el ácido carmínico, el cual es derivado de antraquinona (figura 4). Este colorante es soluble en agua, estable a la oxidación, a la luz y a elevadas temperaturas. Sin embargo, poco se sabe acerca de la capacidad antioxidante de éste. González *et al.* (2010) evaluaron la actividad antioxidante de la grana cochinilla, y concluyeron que presenta una notable actividad como eliminador de radicales libres tanto en soluciones acuosas como metanólicas; siendo su actividad comparable con la de antioxidantes como la quercetina, ácido ascórbico y trolox. Además, debido a la acción protectora que ejerce

FIGURA 4



Estructura química del ácido carmínico.

Fuente: González *et al.* (2010).

frente a las oxidaciones de lípidos, el ácido carmínico puede considerarse un colorante funcional (González *et al.*, 2010).

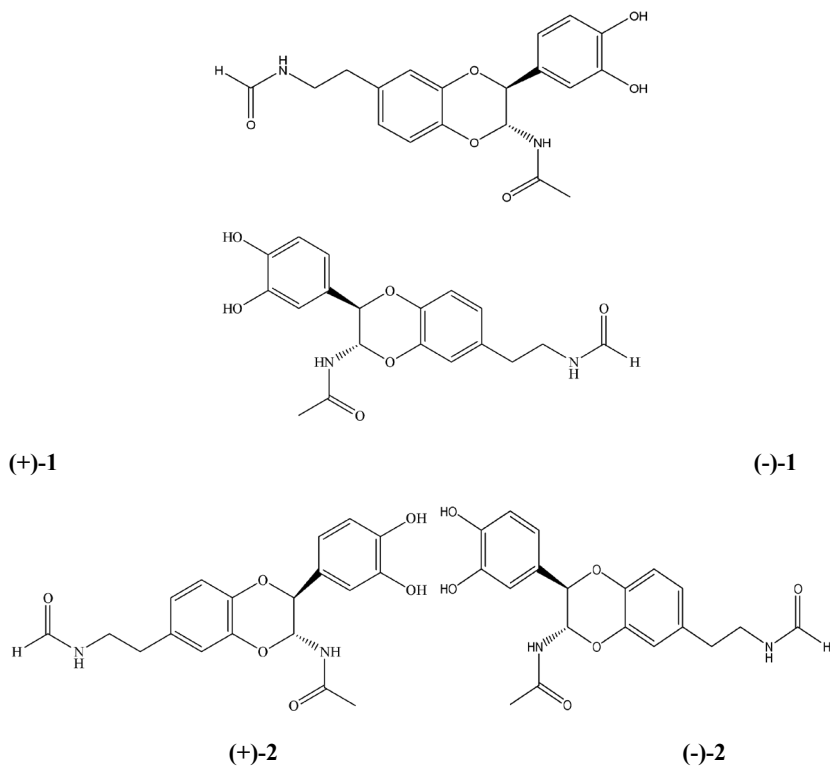
Grillos. *Gryllus bimaculatus* es una de las muchas especies de grillos; pertenece a la familia *Gryllidae*. Es conocido como grillo de campo mediterráneo o grillo de dos manchas. Puede distinguirse de otras especies ya que presenta dos marcas con forma de lunares en la base de sus alas. Extractos de metanol y acuoso obtenidos de *G. bimaculatus* redujeron las concentraciones de etanol en sangre y mejoraron el metabolismo mitocondrial del hígado, mostrando un efecto protector contra lesiones hepáticas agudas (Ahn *et al.*, 2004).

Otros estudios muestran que el glicosaminoglicano aislado de *G. bimaculatus* presenta actividad antiinflamatoria en un modelo de artritis crónica en rata, lo cual sugiere que *G. bimaculatus* podría utilizarse como un alimento funcional para tratar enfermedades inflamatorias como la artritis crónica (Ahn *et al.*, 2014). Lee *et al.* (2020) aislaron del extracto de metanol de *G. bimaculatus* dos pares de dímeros de dopamina, los cuales poseen un grupo formamida; (\pm) -kituramidas A (1) y B (2) (figura5). Estos compuestos mostraron efectos metabólicos que mejoran la expresión de adipocinas (Lee *et al.*, 2020).

Hormigas. Las hormigas pertenecen a la familia de los himenópteros; estos insectos se utilizan en la medicina tradicional en todo el mundo. En la India, las hormigas *Bothroponera rufipes* son machacadas y aplicadas tópicamente para el tratamiento de la sarna, heridas y quemaduras (Chakravorty *et al.*, 2011). Además, *B. rufipes* se consume molida y mezclada con agua para el tratamiento de dolor de muelas, y se ha visto que el consumo diario de una a dos hormigas reduce los niveles de presión sanguínea. En África, Australia e India, las hormigas tejedoras *Oecophylla smaragdina* se utilizan para tratar la tos severa, la gripe y el resfriado (Rastogi, 2011).

Las hormigas *Dinoponera* sp. son utilizadas para el tratamiento del asma en América Latina, y para el dolor de espalda y reumatismo en Brasil (Rastogi, 2011; Sousa *et al.*, 2012). Sousa *et al.* (2012) analizaron el veneno de *Dinoponera* y determinaron que presenta actividad antinociceptiva, lo que sustenta su uso para tratar el dolor en la medicina tradicional. También se observó efecto neuroprotector al ser administrado como tratamiento a ratones con convulsiones inducidas por

FIGURA 5



Dímeros de dopamina aislados de metanol de *G. bimaculatus*.

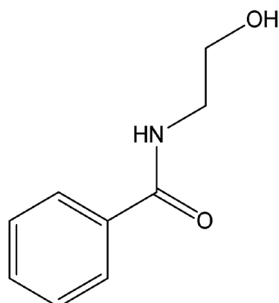
Fuente: Lee *et al.* (2020).

pentilenetetrazol (Soares *et al.*, 2013), lo cual es un buen avance en la búsqueda de nuevos tratamientos para la epilepsia.

Las hormigas rojas (*Tetramorium* sp.) se utilizan en la medicina tradicional china, de las cuales se aisló el alcaloide N-(2-hydroxyethyl)-benzamide (figura 6) (Song *et al.*, 2012). Este compuesto fue evaluado contra *B. subtilis*, y mostró un efecto inhibitorio en el crecimiento de esta bacteria.

El alcaloide solenopsina A (figura 7), aislado de las hormigas de fuego *Solenopsis invicta* y *Solenopsis germinate*, mostró actividad antiangiogénica (inhibidor de la formación de vasos sanguíneos a partir de vasos preexistentes) (Arbiser *et al.*, 2007).

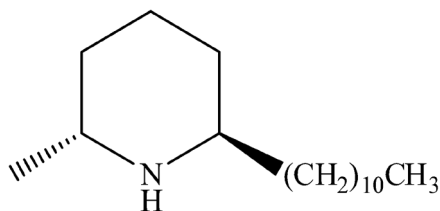
FIGURA 6



N-(2-hydroxyethyl)-benzamide aislado de *Tetramorium* spp.
Fuente: Song *et al.* (2012).

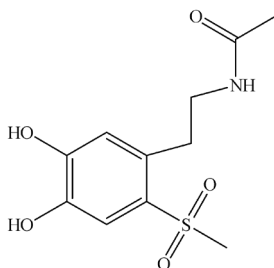
Las hormigas negras chinas *Polyrhachis dives* se utilizan tradicionalmente para tratar la osteoartritis, enfermedades inflamatorias y trastornos asociados al sistema nervioso central. Tang *et al.* (2014) aislaron el compuesto polirhadopamina C (figura 8) de *P. dives*, el cual mostró actividad inmunosupresora y antiinflamatoria, y corroboraron su uso en la medicina tradicional, por lo que este compuesto podría utilizarse para tratar la artritis reumatoide (Tang *et al.*, 2014).

FIGURA 7



Solenopsina A, aislada de las hormigas de fuego *Solenopsis invicta* y *Solenopsis germinata*.
Fuente: Arbiser *et al.* (2007).

FIGURA 8



Polirhadopamina C aislada de *Polyrhachis dives*.
Fuente: Tang *et al.* (2014).

SEGURIDAD E INSECTOS

A pesar de lo descrito con anterioridad, un punto relevante es que los insectos pueden transportar contaminantes biológicos y químicos, lo cual representa un riesgo para la seguridad alimentaria que dependerá de las especies de insectos y su sustrato, así como de cómo se crían, cosechan y procesan los insectos (EFSA NDA, 2021). Sin embargo, estos mismos riesgos existen para otros alimentos de alta demanda del ser humano.

El riesgo microbiano, químico o de transmitir infecciones zoonóticas a los humanos a través de insectos comestibles parece bajo; no obstante, se requiere una mayor investigación para aclarar los riesgos potenciales para los alimentos y piensos con base de insectos (Dicke *et al.*, 2020), los cuales se pueden controlar en gran medida siguiendo buenas prácticas de higiene durante la cría, manipulación, cosecha, procesamiento, almacenamiento y transporte de insectos y productos a base de insectos, aunado a generar legislaciones, normas o instrumentos regulatorios que lleven al éxito en la producción y comercio de insectos en las cadenas de suministro de alimentos y piensos (FAO, 2021).

CONCLUSIONES Y TENDENCIAS FUTURAS

Si bien el valor cultural de los insectos es muy importante y bien conocido, aún falta mucho trabajo por hacer para incentivar a la población hacia un cambio de mentalidad y así lograr una mayor aceptación para su consumo. Es necesario que las futuras investigaciones se realicen en el marco multi y transdisciplinario con investigación participativa para lograr un mayor entendimiento de la cosmovisión de las distintas etnias mexicanas y lograr un aprovechamiento sostenible de este recurso. Incentivar el uso de los insectos como fuente de proteína alternativa favorecerá a la sociedad y al ambiente, lo cual es parte de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos por la ONU y que buscan incidir en el cambio climático y la desigualdad económica, entre otros problemas.

Se requiere mejorar la investigación sobre las distintas áreas del conocimiento, el desarrollo de marcos regulatorios apropiados para establecer una vía multidisciplinaria para el sector e integrar de manera sostenible la producción y uso de insectos en nuestros sistemas alimentarios. Además, es de vital importancia que la investigación se lleve a cabo de una manera justa y equitativa de los beneficios derivados de la utilización de los recursos genéticos y los conocimientos tradicionales asociados en consonancia con lo establecido en el Protocolo de Nagoya (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2011).

REFERENCIAS

- AGUILAR-RODRÍGUEZ, S. (2019). "Raza y alimentación en el México del siglo XX", *Interdisciplina*, 7(19), 119-138.
- AHN, M. Y., Han, J. W., Hwang, J. S., Yun, E. Y., y Lee, B. M. (2014). "Anti-inflammatory effect of glycosaminoglycan derived from *Gryllus bimaculatus* (a type of cricket, insect) on adjuvant-treated chronic arthritis rat model", *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part A: Current Issues*, 77, 1332-1345.
- AHN, M. Y., Lee, Y. W., Ryu, K. S., Lee, H. S., Kim, I., Kim, J. W., y Lim, S. S. (2004). "Effects of water and methanol extracts of

- cricket (*Gryllus bimaculatus*) on alcohol metabolism”, *Korean Journal of Pharmacognosy*, 35(2), 175-178.
- ALONSO-CASTRO, A. J., Carranza-Álvarez, C., Maldonado-Miranda, J. J., del Rosario Jacobo-Salcedo, M., Quezada-Rivera, D. A., Lorenzo-Márquez, H., ... y Medellín-Milán, P. (2011). “Zootheapeutic practices in Aquismón, San Luis Potosí, México”, *Journal of Ethnopharmacology*, 138(1), 233-237.
- ARBISER, J. L., Kau, T., Konar, M., Narra, K., Ramchandran, R., Summers, S. A., ... y Bowen, J. P. (2007). “Solenopsin, the alkaloidal component of the fire ant (*Solenopsis invicta*), is a naturally occurring inhibitor of phosphatidylinositol-3-kinase signaling and angiogenesis”, *Blood*, 109(2), 560-565.
- BLAS, M., y del Hoyo, J. (2013). “Entomología cultural y conservación de la biodiversidad: los insectos en las artes mayores”, *Cuadernos de Biodiversidad*, 42, 1-22.
- CAPPER, J. L. (2013). “Should we reject animal source foods to save the planet? A review of the sustainability of global livestock production”, *South African Journal of Animal Science*, 43(3), 233-246.
- CASTRO-TORRES, R., y Llanderal-Cázares, C. (2016). “Detailed morphology of all life stages of the agave red worm, *Comadia redtenbacheri* (Hammerschmidt) (Lepidoptera: Cossidae)”, *Neotropical Entomology*, 45(6), 698-711.
- CHAKRAVORTY, J., Ghosh, S., y Meyer-Rochow, V. B. (2011). “Practices of entomophagy and entomotherapy by members of the Nyishi and Galo tribes, two ethnic groups of the state of Arunachal Pradesh (North-East India)”, *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 7(1), 5.
- CHAPMAN, A. D. (2009). *Numbers of living species in Australia and the World*. Canberra: Australian Biological Resources Study.
- COLL-HURTADO, A. (1998). “Oaxaca: geografía histórica de la grana cochinilla”, *Investigaciones Geográficas*, 36, 71-82.
- CORZO, G., Villegas, E., Gómez-Lagunas, F., Possani, L. D., Belokoneva, O. S., y Nakajima, T. (2002). “Oxyopinins, large amphipathic peptides isolated from the venom of the wolf spider *Oxyopes kitabensis* with cytolytic properties and positive insecticidal

- cooperativity with spider neurotoxins”, *Journal of Biological Chemistry*, 277(26), 23627-23637.
- CRUZ, P. D., y Peniche, C. (2018). “La domesticación y crianza de insectos comestibles: una línea de investigación poco explorada y con gran potencial para el desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria en México”, *Folia Entomológica Mexicana*, 4(2), nueva serie, 66-79.
- DANGLES, O., y Casas, J. (2019). “Ecosystem services provided by insects for achieving sustainable development goals”, *Ecosystem Services*, 35, 109-115.
- DÍAZ-SÁNCHEZ, Á. A., Barrientos-Lozano, L., Almaguer-Sierra, P., y Blanco-Macías, F. (2015). “Cromatismo y morfometría de ninfas de la langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons* Walker, 1870) en el sur de Tamaulipas, México”, *Acta Zoológica Mexicana*, 31(2), 298-305.
- DICKE, M., Ellenberg, J., Salles, J. F., Jensen, A. B., Lecocq, A., Pijlman, G. P., van Loon, J. J. A. y van Oers, M. M. (2020). “Edible insects unlikely to contribute to transmission of coronavirus SARS-CoV-2”, *Journal of Insects as Food and Feed*, 6, 333-339.
- DOSSEY, A. T. (2010). “Insects and their chemical weaponry: new potential for drug discovery”, *Natural Product Reports*, 27(12), 1737-1757
- EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens) (2021). “Scientific opinion on the safety of yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food pursuant to regulation (EU) 2015/2283”, *EFSA Journal*, 19, 6343.
- FAO (2021). *Looking at edible insects from a food safety perspective. Challenges and opportunities for the sector*. Roma: Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO (2017). *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. Roma: Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FIGUEROA, G. A., Méndez, C. H. H., Cauich, J. G. D., Rodríguez, L. V., y Caballero, V. P. (2016). “Medición del color en productos cosméticos elaborados con subproductos de la grana cochinilla”, *Acta Universitaria*, 26(1), 3-7.

- FLETA ZARAGOZANO, J. (2018). "Entomophagy: an alternative to our traditional diet?", *Sanidad Militar*, 74(1), 41-46.
- GARCÍA, F., Villegas, E., Espino-Solis, G. P., Rodriguez, A., Paniagua-Solis, J. F., Sandoval-Lopez, G., ... y Corzo, G. (2013). "Antimicrobial peptides from arachnid venoms and their microbicidal activity in the presence of commercial antibiotics", *Journal of Antibiotics*, 66(1), 3-10.
- GONZÁLEZ, M., Méndez, J., Carnero, A., Lobo, M. G., y Afonso, A. (2002). "Optimizing conditions for the extraction of pigments in cochineals (*Dactylopius coccus* Costa) using response surface methodology", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(24), 6968-6974.
- GONZÁLEZ, E. A., García, E. M., y Nazareno, M. A. (2010). "Free radical scavenging capacity and antioxidant activity of cochineal (*Dactylopius coccus* C.) extracts", *Food Chemistry*, 119(1), 358-362.
- HOGUE, C. L. (1987). "Cultural entomology", *Annual Review of Entomology*, 32(1), 181-199.
- INFANTE-RODRÍGUEZ, D., Monribot-Villanueva, J., Mehltreter, K., Carrión, G., Lachaud, J. P., Velázquez-Narváez, A. C., ... y Guerrero-Analco, J. (2020). "Phytochemical characteristics of leaves determine foraging rate of the leaf-cutting ant *Atta mexicana* (Smith) (*Hymenoptera: Formicidae*)", *Chemoecology*, 30, 147-159.
- JONGEMA, Y. (2017). *List of edible insect species of the world*. Países Bajos: Laboratory of Entomology, Wageningen University. <https://www.wur.nl/en/Research-Results/Chair-groups/Plant-Sciences/Laboratory-of-Entomology/Edible-insects/Worldwide-species-list.htm>.
- KAMPMEIER, G. E., e Irwin, M. E. (2009). "Commercialization of insects and their products", en *Encyclopedia of insects*. Academic Press, 220-227.
- LARA-JUÁREZ, P., Aguirre Rivera, J. R., Castillo Lara, P. y Reyes Agüero, J. A. (2015). "Biología y aprovechamiento de la hormiga de escamoles, *Liometopum apiculatum* Mayr (*Hymenoptera: Formicidae*)", *Acta Zoológica Mexicana*, 31(2), 251-264.

- LÓPEZ-GÓMEZ, J. A., Mariaca-Méndez, R., y Gómez, B. (2013). “Conocimiento tradicional y antropofagia del ‘chanulte’ en Oxchuc, Chiapas, México”, *Etnobiología*, 11(2): 69-80.
- LOSEY, J. E., y Vaughan, M. (2006). “The economic value of ecological services provided by insects”, *Bioscience*, 56(4), 311-323.
- LUNA-VALADEZ, B., Macías-Rodríguez, F. J., Esparza-Frausto, G., León-Esparza, E., Tarango-Arámbula, L. A., y Méndez-Gallego, S de J. (2013). “Recolección de insectos comestibles en Pinos, Zacatecas: descripción y análisis de la actividad”, *AGROProductividad*, 6(5), 35-44.
- LEE, S. R., Yi, S. A., Nam, K. H., Park, J. G., Hwang, J. S., Lee, J., y Kim, K. H. (2020). “(±)-Kituramides A and B, pairs of enantiomeric dopamine dimers from the two-spotted cricket *Gryllus bimaculatus*”, *Bioorganic Chemistry*, 95, 103554.
- MÉZES, M. (2018). “Food safety aspect of insects: a review”, *Acta Alimentaria*, 47(4), 513-522
- MI, Y. A., Hye, J. B., In, S. K., Eun, J. Y., Seung, J. K., Hyung, S. K., ... y Byung, M. L. (2005). “Genotoxic evaluation of the biocomponents of the cricket, *Gryllus bimaculatus*, using three mutagenicity tests”, *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A*, 68(23-24), 2111-2118.
- MONTERRAT, E. F., Elena, G. T. M., Belem, C. O. M., Grisel, O. L. A., y Carlos, R. L. J. (2013). “The bedbug ‘xamuis’ (*Thasus gigas*), a new treatment for diabetes or nutrimental culture”, *International Journal of Research in Ayurveda and Pharmacy*, 4(6), 881-884.
- MORALES-RAMOS, J. A., Rojas, M. G., Dossey, A. T. y Berhow, M. (2020). “Self-selection of food ingredients and agricultural by-products by the house cricket, *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae): a holistic approach to develop optimized diets”, *PLOS ONE*, 15, e0227400.
- Naturalista (2021). “[Insectos]”. https://www.naturalista.mx/observations?place_id=6793&subview=map&taxon_id=47158.
- NORIEGA, J. A., Hortal, J., Azcárate, F. M., Berg, M. P., Bonada, N., Briones, M. J., ... y Santos, A. M. (2018). “Research trends in ecosystem services provided by insects”, *Basic and Applied Ecology*, 26, 8-23

- PÉREZ-RAMÍREZ, R., Torres-Castillo, J. A., Barrientos-Lozano, L., Almaguer-Sierra, P., y Torres-Acosta, R. I. (2019). “*Schistocerca piceifrons piceifrons* (Orthoptera: Acrididae) as a source of compounds of biotechnological and nutritional interest”, *Journal of Insect Science*, 19(5), 10.
- PONCE-SAAVEDRA, J., Francke, O. F., Quijano-Ravell, A. F., y Santillán, R. C. (2016). “Alacranes (*Arachnida: Scorpiones*) de importancia para la salud pública en México”, *Folia Entomológica Mexicana*, 2(3), 45-70.
- RAMOS-ELORDUY, J. (2009). “Anthropo-entomophagy: cultures, evolution and sustainability”, *Entomological Research*, 39(5), 271-288.
- RAMOS-ELORDUY, J. (2004). “La etnoentomología en la alimentación, la medicina y el reciclaje”, en J. E. Llorente Bousquets, J. J. Morrone, O. Yáñez e I. F. Vargas (eds.), *Biodiversidad, taxonomía y biogeografía de artrópodos de México: hacia una síntesis de su conocimiento*. México; UNAM, Facultad de Ciencias, 329-413.
- RAMOS-ELORDUY, J. y Pino, J. M. (2003). “Enfermedades tratadas con insectos en el continente americano”, *Entomología mexicana*, 2, 604-611
- RAMOS-ELORDUY J., y Pino Moreno, J. M. (2004). “Los *Coleoptera* comestibles de México”, *Anales del Instituto de Biología*, serie zoología, 75(1), 149-183.
- RAMOS-ELORDUY, J., y Pino Moreno, J. M. (2001). “Contenido de vitaminas de algunos insectos comestibles de México”, *Revista de la Sociedad Química de México*, 45(2), 66-76.
- RAMOS-ELORDUY, J., y Pino Moreno, J. M. (1989). *Los insectos comestibles en el México antiguo: estudio etnoentomológico*. México: AGT.
- RASTOGI, N. (2011). “Provisioning services from ants: food and pharmaceuticals”, *Asian Myrmecology*, 4(1), 103-120.
- RAHEEM, D., Raposo, A., Oluwole, O. B., Nieuwland, M., Saraiva, A., y Carrascosa, C. (2019). “Entomophagy: nutritional, ecological, safety and legislation aspects”, *Food Research International*, 126, 108672.
- RODRÍGUEZ-MIRANDA, J., Alcántar-Vázquez, J. P., Zúñiga-Marroquín, T., y Juárez-Barrientos, J. M. (2019). “Insects as an alternative source of protein: a review of the potential use of grasshopper

- (*Sphenarium purpurascens* Ch.) as a food ingredient”, *European Food Research and Technology*, 245(12), 2613-2620.
- RUIZ, J. A., Bravo, E., Ramírez, G., Báez, A., Álvarez, M., Ramos, J., ... y Byerly, K. (2013). *Plagas de importancia económica en México: aspectos de su biología y ecología*, libro técnico núm. 2. Jalisco: Inifap / Cirpac-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, Tepatitlán de Morelos.
- RUMPOLD, B. A., y Schlüter, O. K. (2013). “Nutritional composition and safety aspects of edible insects”, *Molecular Nutrition & Food Research*, 57, 802-823.
- SAHAGÚN, B. (1957). *Historia general de las cosas de Nueva España* [1577]. <https://www.wdl.org/en/item/10096/view/1/1/>.
- SALINAS, C. M. (2018). “Mexican cochineal, local technologies and the rise of global trade from the sixteenth to the nineteenth centuries”, en *Global History and New Polycentric Approaches*. Singapur: Palgrave Macmillan, 255-273.
- Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica (2011). “Protocolo de Nagoya sobre acceso a los recursos genéticos y participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de su utilización al convenio sobre la diversidad biológica”. Montreal: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- SOARES, K., Vasconcelos, E. R., Lima, C. N., Linhares, M. I., Costa, A. F., Havt, A., ... Y Costa, A. M. (2013). “The effects of the Brazilian ant *Dinoponera quadriceps* venom on chemically induced seizure models”, *Neurochemistry International*, 63(3), 141-145.
- SONG, Z. W., Liu, P., Yin, W. P., Jiang, Y. L., y Ren, Y. L. (2012). “Isolation and identification of antibacterial neo-compounds from the red ants of ChangBai Mountain, *Tetramorium* sp.”, *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 22(6), 2175-2181.
- SOUSA, P. L., Quinet, Y., Ponte, E. L., Do Vale, J. F., Torres, A. F. C., Pereira, M. G., y Assreuy, A. M. S. (2012). “Venom’s antinociceptive property in the primitive ant *Dinoponera quadriceps*”, *Journal of Ethnopharmacology*, 144(1), 213-216.
- TANG, J. J., Zhang, L., Jiang, L. P., Di, L., Yan, Y. M., Tu, Z. C., ... y Cheng, Y. X. (2014). “Dopamine derivatives from the insect

- Polyrhachis dives* as inhibitors of ROCK1/2 and stimulators of neural stem cell proliferation”, *Tetrahedron*, 70(46), 8852-8857.
- TRIPLEHORN, C. A., y Johnson, N. F. (2005). *Borror and DeLongis introduction to the study of insects*. Pacific Grove: Brooks / Cole Thomson Learning.
- TORRES-CASTILLO, J. A., Sinagawa-García, S. R., Torres-Acosta, R. I., García-García, L. D., Ramos-Rodríguez, A. G., Villanueva-Bocanegra, B., y Moreno-Ramírez, Y. D. R. (2018). “Entomochemicals from *Pterophylla beltrani* (Bolívar & Bolívar): antioxidants and other metabolites”, *Southwestern Entomology*, 43(2), 369-381.
- VALDEZ-VELÁZQUEZ, L. L., Romero-Gutiérrez, M. T., Delgado-Enciso, I., Dobrovinskaya, O., Melnikov, V., Quintero-Hernández, V., y Possani, L. D. (2016). “Comprehensive analysis of venom from the scorpion *Centruroides tecomanus* reveals compounds with antimicrobial, cytotoxic, and insecticidal activities”, *Toxicon*, 118, 95-103.
- VALERINO-PEREA, S., Armstrong, M. E. G., y Papadaki, A. (2020). “Development of an index to assess adherence to the traditional Mexican diet using a modified Delphi method”, *Public Health Nutrition*, 13, 1-10.
- VALERINO-PEREA, S., Lara-Castor, L., Armstrong, M., y Papadaki, A. (2019). “Definition of the traditional Mexican diet and its role in health: a systematic review”, *Nutrients*, 11, 2803.
- VAN HUIS, A., Van Itterbeeck, J., Klunder, H., Mertens, E., Halloran, A., Muir, G., y Vantomme, P. (2013). *Edible insects: future prospects for food and feed security* (No. 171). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- VIESCA GONZÁLEZ, F. C., y Contreras, A. T. R. (2009). “La entomofagia en México. Algunos aspectos culturales”, *El Periplo Sustentable*, 16, 57-83.
- ZARAGOZA-CABALLERO, S., Navarrete-Heredia, J. L., y Ramírez García, E. (2017). *Temolines. Los coleópteros entre los antiguos mexicanos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

CAPÍTULO 7
PROSPECCIÓN DEL POTENCIAL
BIOTECNOLÓGICO DE BACTERIAS EPÍFITAS
AISLADAS DE PLANTAS DESÉRTICAS Y
SEMIDESÉRTICAS

CECILIA CASTRO-LÓPEZ
MANUEL A. VARGAS-ORTIZ
AARÓN F. GONZÁLEZ-CÓRDOVA
BELINDA VALLEJO-CÓRDOBA
ADRIÁN HERNÁNDEZ-MENDOZA¹

RESUMEN

Los desiertos son lugares hostiles para el crecimiento de las plantas; sin embargo, éstas pueden prosperar en tales entornos debido a diversas interacciones con microorganismos propios del ecosistema. En este sentido, se ha descrito que la microbiota vegetal, en especial las bacterias epífitas, pueden ayudar a contrarrestar diversos factores de estrés biótico y abiótico al que se encuentran expuestas las plantas, y contribuir así al crecimiento y desarrollo de ellas. Recientemente se ha propuesto que dichas bacterias pudieran poseer características específicas para el metabolismo eficiente y versátil de sustratos, resistencia al estrés, competitividad, entre otras. Esto las convierte en bacterias con potenciales propiedades biotecnológicas y, por ende, con una amplia posibilidad de aplicaciones, incluidas, pero no limitadas a promoción de crecimiento, biocontrol, producción de compuestos bioactivos, o como probióticos. Con base en lo anterior, el objetivo de este capítulo es revisar la literatura existente sobre el aislamiento de bacterias epífitas de plantas desérticas y semidesérticas, así como resumir las principales propiedades biotecnológicas o funcionales

¹ Todos: Laboratorio de Química y Biotecnología de Productos Lácteos. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. (CIAD). Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46 Col. La Victoria, CP. 83304, Hermosillo, Sonora. Autor de correspondencia: ahernandez@ciad.mx.

asociadas a dichas bacterias. Cabe señalar que los datos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y/o moleculares extraídos de estudios actuales posicionan a estas bacterias como herramientas prometedoras para hacer frente a desafíos agrícolas, ambientales e industriales.

PALABRAS CLAVE: plantas desérticas; microbiota; bacterias epífitas; biotecnología; bioactividad.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas desérticos y semidesérticos se encuentran en todos los continentes y representan cerca de un 30-40% de la superficie terrestre total (Makhalanyane *et al.*, 2015). Específicamente, estas regiones existen bajo una combinación de condiciones extremas que afectan de forma negativa a los organismos vivos, como altas temperaturas, alta salinidad y acidez del suelo, bajos niveles de agua y nutrientes, altos niveles de radiación UV, presión hidrostática, potencial redox e inestabilidad física causada por fuertes vientos (Scholes, 2020; Soussi *et al.*, 2016).

A pesar de que los efectos combinados de dichos factores parecen crear ambientes inhabitables, todos aquellos organismos que prosperan en estas condiciones, en especial las plantas, han adoptado estrategias morfológicas, fisiológicas y bioquímicas que les permiten aliviar el estrés abiótico (Eida *et al.*, 2018). Concretamente, mediante la evolución de mecanismos específicos como la modificación del sistema de raíces, cambio en la reflectancia y orientación de las hojas, reducción de la fotorrespiración y ahorro de agua (metabolismo del ácido crasuláceo), alteraciones en las principales vías fotosintéticas, transpiración escalada de flujo de savia, entre otros (Sun *et al.*, 2020).

Asimismo, se ha reconocido que las plantas desérticas albergan una comunidad de microorganismos altamente compleja que puede tener un gran impacto en su salud y adaptación al estrés, condiciones esenciales para el crecimiento, supervivencia, reproducción y establecimiento en estos ecosistemas (Saad *et al.*, 2020). Entre estos microorganismos, las bacterias epífitas han destacado debido a que poseen mecanismos de adaptación especial, en parte relacionados con su capacidad de expresar y regular sólo los genes necesarios para sobrevivir y responder adecuadamente a la composición física y química de los ambientes desérticos (Alsharif *et al.*, 2020). Lo anterior lleva a estas bacterias a desempeñar funciones de gran importancia a las plantas que las alojan, tales como el aumento de la disponibilidad y absorción de agua y nutrientes, estímulo de la germinación de semillas y crecimiento de plantas, así como promoción de la resistencia al estrés ambiental, por ejemplo, sequía, salinidad y frío (Dastogeer *et al.*, 2020).

En virtud de estas características particulares, las bacterias epífitas pueden ser empleadas en diversas aplicaciones biotecnológicas como

promotoras del crecimiento de plantas, agentes de biocontrol contra patógenos, productoras de compuestos bioactivos, cultivos iniciadores para la obtención de diferentes productos, entre otras (Cherif *et al.*, 2015; Soussi *et al.*, 2016). Con base en lo anterior, el objetivo de este capítulo es revisar la literatura existente sobre el aislamiento de bacterias epífitas de plantas desérticas y semidesérticas, así como resumir las principales propiedades biotecnológicas o funcionales asociadas a dichas bacterias. Para ello, se realizó una revisión exhaustiva y estructurada de la literatura empleando los principales motores de búsqueda con acceso a bases de datos científicas: PubMed, Scopus, Web of Science, Science Direct, ResearchGate y Scientific Electronic Library Online (SciELO). Las frases o palabras clave de búsqueda fueron “desert plants”, “desert microbes”, “plant-associated microbiome”, “rhizosphere”, “phyllosphere”, “anthosphere”, “endophytic bacteria”, “bacterial isolates”, “microbial communities” y “biotechnological potential”.

PLANTAS DESÉRTICAS Y SEMIDESÉRTICAS COMO HOLOBIONTES

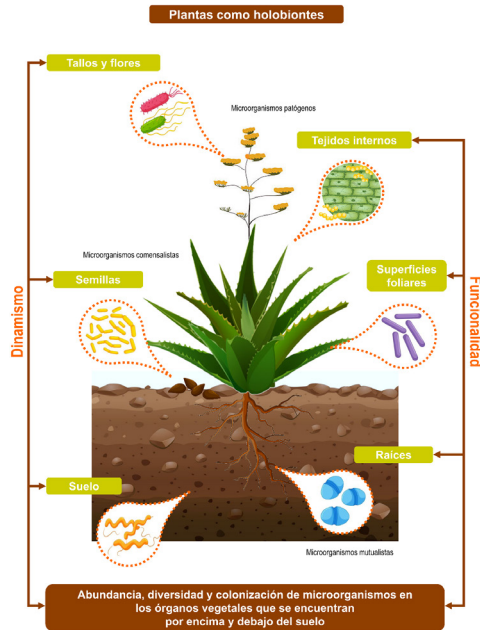
Aunque las plantas que prosperan en ecosistemas desérticos y semidesérticos han adoptado sus propias estrategias de supervivencia en estas regiones, se ha descrito que su adaptación también depende de los microorganismos que las habitan (Hassani *et al.*, 2018; Soussi *et al.*, 2016). En este sentido, se considera que las interacciones entre las plantas y sus comunidades microbianas asociadas no son unidireccionales (Turner *et al.*, 2013). Es decir, la planta también puede proporcionar nuevas capacidades metabólicas a sus asociados microbianos, lo que lleva a la adaptación de habitantes de nicho especializados, los cuales pueden tener un impacto positivo (mutualista), neutral (comensalista) o deletéreo (patógeno) en la adecuación de la planta (Hassani *et al.*, 2018).

Debido a estas asociaciones, se ha propuesto que las plantas se consideren como un “holobionte” en lugar de entidades independientes. Este concepto define al huésped multicelular (planta) y su microbiota asociada como una sola entidad dinámica y funcional, partiendo de una visión colectiva de las funciones e interacciones que existen entre ellos (Vandenkoornhuyse *et al.*, 2015). Se ha sugerido que dichas interacciones

planta-microorganismos no son eventos aislados a una parte específica de la planta huésped, sino que se extienden conjuntamente desde el suelo hasta los diversos compartimentos vegetales (tejidos internos y externos) (Coleman-Derr *et al.*, 2016). Por consiguiente, se espera que la composición o ensamblaje de la microbiota central de la planta varíe con respecto al medio ambiente, suelo y los diferentes compartimentos físicos.

Tal como se observa en la figura 1, las plantas desérticas y semidesérticas viven en estrecha asociación con los microorganismos que habitan en su superficie exterior, tejidos internos, semillas, raíces, así como en el suelo circundante. Es así que el dinamismo establecido permite a los organismos involucrados afrontar las duras condiciones ambientales (Sánchez-Cañizares *et al.*, 2017). A continuación, se describe la composición principal de la microbiota de plantas desérticas y semidesérticas en función de los factores antes mencionados.

FIGURA 1



El origen del holobionte vegetal.

Fuente: Adaptada de la descripción hecha por Compant *et al.* (2019).

Microbiota rizosférica, foliar y floral nativa

Las plantas reclutan de modo activo a su microbiota a partir de los reservorios microbianos circundantes, principalmente de: i) la rizosfera, que es la parte del suelo inmediata a las raíces vivas y cuyas características son determinadas por diversos factores edáficos (*i.e.*, estructura y tipo de suelo, temperatura, humedad, pH y acidez, y salinidad), ii) la filosfera, que es la parte aérea de la planta que comprende las partes foliares vegetativas, en las que la parte dominante son las hojas, y iii) la antosfera, es decir, la región formada por, y alrededor, de las flores (Compant *et al.*, 2019; Dastogeer *et al.*, 2020). En el cuadro 1 se reporta la diversidad microbiana asociada a plantas (estructuras vegetales) que crecen en ecosistemas desérticos.

Las propiedades físicas y químicas del suelo, denominadas factores edáficos, se han reconocido como el filtro ecológico básico que afecta a la estructura de la microbiota rizosférica (Makhalanyane *et al.*, 2015; Vásquez-Dean *et al.*, 2020). Con base en la participación de dichos factores, los ensamblajes de comunidades microbianas que viven en la rizosfera se caracterizan por ser los de mayor abundancia y dinamismo dentro de todos los tejidos/órganos vegetales. Dichas comunidades están compuestas por varias especies que pueden tener efectos tanto benéficos como perjudiciales sobre el desarrollo y la salud de la planta hospedante. Entre estos organismos se encuentran bacterias, arqueas, hongos (*e.g.*, oomicetos, micorrizas), virus y protozoos (de Faria *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021).

Por su parte, la filosfera es un hábitat frecuentemente expuesto a fluctuaciones ambientales extremas, incluidos el estrés por temperatura, luz, radiación ultravioleta y menor disponibilidad de agua y nutrientes (Thapa y Prasanna, 2018). Esto hace que las hojas sean un ambiente más dinámico y con un menor tiempo de vida que las raíces, imponiendo así restricciones a las comunidades microbianas colonizadoras. Además, las hojas poseen diferentes estrategias y estructuras (*e.g.*, capas de cera, órganos multicapa, producción de compuestos secundarios, etc.) que también pueden afectar dicha colonización (Bashir *et al.*, 2022). No obstante, la filosfera está integrada por una plétora de microorganismos, cada uno con su propio conjunto de atributos y funcionalidades (Stone *et al.*, 2018). En este sentido, la filosfera está poblada por una microbiota

diversa, aunque menos abundante en comparación con su contraparte rizosférica. Así, además de miembros pertenecientes a las bacterias, este medio está colonizado por otros grupos taxonómicos incluidos hongos, levaduras, algas, arqueas, protozoos y nemátodos (Compant *et al.*, 2019; Parasuraman *et al.*, 2019).

Por último, es innegable la importancia de la función de las flores para la reproducción sexual y el desarrollo de semillas y frutos; sin embargo, al ser estructuras complejas, se ha reconocido que sus diversos tejidos parecen favorecer el reclutamiento de poblaciones microbianas abundantes y taxonómicamente diversas respecto de otros compartimentos vegetales (Rebolleda-Gómez *et al.*, 2019). Esto último se debe, en parte, a su ubicación en la planta, lo que facilita la dispersión microbiana con el viento, la lluvia, las semillas y los polinizadores (McArt *et al.*, 2014). Además, las estructuras florales (pétalos, sépalos, carpelos y estambres) sirven como un entorno/hábitat protector rico en compuestos de carbono y nitrógeno para el crecimiento microbiano (Nelson, 2018). En este sentido, la microbiota de la antosfera parece ser muy distinta y dinámica en comparación con otros órganos vegetales, especialmente de las hojas (filosfera) y suelo (rizosfera); en particular, dicha microbiota puede contener miembros mutualistas y patógenos, dentro de los cuales se encuentran especies pertenecientes a hongos, bacterias, arqueas, y, en frecuencias más bajas, protistas y virus (Rebolleda-Gómez *et al.*, 2019).

Bacterias endófitas y exófitas

Entre la diversa comunidad de microorganismos residentes en las plantas desérticas y semidesérticas, las bacterias son consideradas como los colonizadores dominantes. Las diversas partes de las plantas presentan una densa población de bacterias estimada entre 10^2 a 10^{12} células cm^{-2} o g^{-1} de planta/tejido (Afzal *et al.*, 2019). Este fenómeno se puede atribuir a las diversas estrategias que exhiben las bacterias para colonizar, sobrevivir e interactuar con la planta hospedera (Thapa y Prasanna, 2018).

Con base en lo anterior, se ha descrito que la colonización bacteriana puede ocurrir en dos hábitats vegetales diferentes: i) endofítico o 2) exofítico. Así pues, las bacterias endófitas se pueden definir como aquellos

microorganismos que colonizan el tejido interno de la planta (dentro de las células, en los espacios intercelulares o en los sistemas vasculares), mientras que las bacterias exófitas son aquellas capaces de crecer en la superficie de todas las partes de la planta (Kumar *et al.*, 2017).

Referente a las bacterias endófitas, su distribución dentro del tejido vegetal es heterogénea y el proceso de colonización es considerado altamente competitivo debido a la ocupación de espacios y obtención de nutrientes. Este proceso tiene lugar mediante estomas, lenticelas, radicales germinantes, semillas y raíces (principales y laterales emergentes), y, dependiendo del tejido específico, la población bacteriana puede oscilar entre 10^5 y 10^9 células g^{-1} (Franklin *et al.*, 2016).

Aunque se ha reportado una gran diversidad bacteriana endofítica para varias especies de plantas, en general, estas comunidades están dominadas por cuatro filos principales: *Proteobacteria* (incluidas las clases α -, β - y γ -*Proteobacteria*), *Actinobacteria*, *Bacteroidetes* y *Firmicutes*. Otros filos como *Acidobacteria*, *Planctomycetes* y *Verrucomicrobia* se encuentran con menor frecuencia; sin embargo, el predominio de éstos puede variar según el tipo de especie de planta hospedera. Entre los géneros bacterianos comúnmente aislados se encuentran *Bacillus*, *Delftia*, *Methylobacterium*, *Burkholderia*, *Microbacterium*, *Micrococcus*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Paenibacillus* y *Stenotrophomonas* (Afzal *et al.*, 2019).

Por otra parte, las bacterias exófitas colonizan todas las partes expuestas de la planta por medio de la acción de diversos factores, como las condiciones ambientales o los insectos, la composición química de la cutícula, presencia de venas y apéndices superficiales, entre otros (Sánchez-Cañizares *et al.*, 2017). Después de colonizar, las bacterias exófitas pueden diseminarse sistémicamente y establecer poblaciones específicas en los tejidos, donde las densidades bacterianas suelen oscilar entre 10^5 y 10^7 células g^{-1} de raíz y entre 10^3 y 10^4 células g^{-1} de hojas y tallos; mientras que en las flores y frutos se encuentran típicamente 10^2 - 10^3 células g^{-1} de tejido (Kumar *et al.*, 2017).

Similar a las bacterias endófitas, los filos de *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Firmicutes* y *Proteobacteria* son los principales colonizadores de la superficie de las plantas; sin embargo, algunos géneros bacterianos, incluidos *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Aspergillus*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Haloarcula*,

Halobacterium, *Halococcus*, *Haloferax*, *Methylobacterium*, *PaeniBacillus*, *Penicillium*, *Piriformospora*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* y *Serratia*, parecen componer el centro de las comunidades exófitas (Schlechter *et al.*, 2019).

CUADRO 1
DIVERSIDAD MICROBIANA ASOCIADA A PLANTAS
QUE CRECEN EN ECOSISTEMAS DESÉRTICOS

Zona geográfica/ Características	Planta hospedera (estructura vegetal)	Filos, familias, géneros o especies dominantes (cepas aisladas)	Referencias
Desierto de Namib (Oriente de África)/ Árido, vientos fuertes	<i>Tylosema esculentum</i> (semillas)	Proteobacteria, Firmicutes, Actinobacteria y Bacteroidetes (<i>Rhizobium</i> , <i>Massilia</i> , <i>Kosakonia</i> , <i>Pseudorhodoferax</i> , <i>Caulobacter</i> , <i>Pantoea</i> , <i>Sphingomonas</i> , <i>Burkholderia</i> , <i>Methylobacterium</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Curtobacterium</i> , <i>Microbacterium</i> , <i>Mucilaginibacter</i> y <i>Chitinophaga</i>)	Chimwamu- rombe <i>et al.</i> (2016)
Desierto de Gurbantünggüt (Noroeste de China)/ Semiárido, seco, salino	<i>Lepidium perfoliatum</i> L. (hojas, tallos y raíces)	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus flexus</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Bacillus mojavensis</i> , <i>Bacillus sonorensis</i> , <i>Bacillus cereus</i> y <i>Bacillus safensis</i>	Li <i>et al.</i> (2017)
Desierto de Namib (Oriente de África)/ Árido, vientos fuertes	<i>Stipagrostis sabulicola</i> , <i>Stipagrostis seebyae</i> y <i>Cladoraphis spinosa</i> (raíces)	Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes y Chloroflexi (<i>Pseudonocardiaceae</i> , <i>Streptomycetaceae</i> , <i>Methylobacteriaceae</i> , <i>Nocardioidaceae</i> , <i>Hyphomicrobiaceae</i> , <i>Microbacteriaceae</i> y <i>Micrococcaceae</i>)	Marasco <i>et al.</i> (2018)
Desierto de Atacama (Norte de Chile)/ Semiárido a árido	<i>Distichlis spicata</i> , <i>Pluchea absinthioides</i> , <i>Gaultheria mucronata</i> y <i>Hieracium pilosella</i> (raíces y hojas)	Proteobacteria, Firmicutes, Actinobacteria, Bacteroidetes y Euryarchaeota (<i>Halobacteriaceae</i> , <i>Bacillaceae</i> , <i>Nocardiopsaceae</i> y <i>Pseudomonaceae</i>)	Zhang <i>et al.</i> (2019)

CUADRO 1
DIVERSIDAD MICROBIANA ASOCIADA A PLANTAS
QUE CRECEN EN ECOSISTEMAS DESÉRTICOS (continuación)

Zona geográfica/ Características	Planta hospedera (estructura vegetal)	Filos, familias, géneros o especies dominantes (cepas aisladas)	Referencias
Zonas del centro México (Guanajuato y Jalisco) Semiárido a árido/semiseco a seco	<i>Agave tequilana</i> , <i>Agave salmiana</i> , <i>Myrtillocactus</i> <i>geometrizans</i> y <i>Opuntia robusta</i> (raíces, hojas, tallos y suelo circundante)	Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes, Acidobacteria, Bacteroidetes, Cyanobacteria, Euryarchaeota y Thaumarchaeota (<i>Aeromonadaceae</i> , <i>Bacillidae</i> , <i>Methylobacteriaceae</i> , <i>Sphingomonadaceae</i> , <i>Rhodospirillaceae</i> , <i>Belnapia</i> , <i>Chroococciopsidaceae</i> , <i>Enterobacteriaceae</i> , <i>Pseudomonadaceae</i> , <i>Burkholderiaceae</i> , <i>Rhizobiaceae</i> , <i>Nostocaceae</i> , <i>Mixococcaceae</i> y <i>Propionibacteriaceae</i>)	Flores-Núñez <i>et al.</i> (2020)
Desierto de Taklamakán (Noroeste de China) Muy árido/ seco/frío	<i>Alhagi</i> <i>sparsifolia</i> Shap. (raíces)	Proteobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes y Firmicutes (<i>Kocuria</i> , <i>Halomonas</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Truepera</i> , <i>Planococcus</i> , <i>Stenotrophomonas</i> , <i>Achromobacter</i> y <i>Undibacterium</i>) / <i>Pseudomonas</i> sp. LTGT-11-2Z	Zhang <i>et al.</i> (2020)
Desierto de Cholistan (Suroeste de Pakistán) Árido/seco/ salino	<i>Zygophyllum</i> <i>simplex</i> , <i>Haloxylon</i> <i>salicoricum</i> , <i>Aerva javanica</i> y <i>Capparis</i> <i>decidua</i> (raíces y suelo circundante)	Proteobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes, Firmicutes, Chloroflexi, Gemmatimonadetes, Fusobacteria, Deinococcus- Thermus, Acidobacteria y Nitrospirae (<i>Bacillus</i> , <i>Kocuria</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Halomonas</i> , <i>Flavobacterium</i> , <i>Sphingobacterium</i> , <i>Clostridium</i> , <i>Deltaproteobacterium</i> y <i>Halobacterium</i>)	Mukhtar <i>et al.</i> (2021)

ESTADO ACTUAL DE LAS APLICACIONES BIOTECNOLÓGICAS DE LAS BACTERIAS EPÍFITAS

Promotores de crecimiento

Las bacterias promotoras del crecimiento de plantas (PGPB) pertenecen a un grupo benéfico de microorganismos que forma interacciones simbióticas con sus plantas hospederas. Éstas son cruciales para los cultivos, ya que son capaces de mejorar el crecimiento de las plantas y protegerlas de enfermedades y estrés abióticos (ALKahtani *et al.*, 2020). En este sentido, los mecanismos de acción por los que las PGPB estimulan el crecimiento vegetal involucran la i) fijación de nutrientes para una fácil absorción por parte de la planta, ii) producción de reguladores del crecimiento (fitohormonas) y iii) producción de sideróforos y compuestos antimicrobianos, para la prevención de enfermedades de las plantas (Etesami y Maheshwari, 2018; Vejan *et al.*, 2016).

Recientemente, se realizó un estudio para caracterizar bacterias epífitas del cactus del desierto (*Euphorbia trigona* Mill) y evaluar así su capacidad para inducir tolerancia a la sequía y promoción del crecimiento en tomate (Eke *et al.*, 2019). Los aislados se identificaron a nivel de especie y entre los géneros más representativos se encontraron *Bacillus*, *Stenotrophomonas*, *Lysinibacillus*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Sphingobacterium*, *Proteus* y *Klebsiella*. Tras su inoculación, las bacterias aumentaron la germinación de semillas y la promoción del crecimiento de plántulas, encontrándose hasta un 118% y un 52% más de biomasa de raíces en condiciones libres de sequía e inducidas por sequía, respectivamente. Además, se registró una alteración positiva del estado oxidativo (decremento de la actividad enzimática de Peroxidasa de guayacol-GPX y Catalasa-CAT), mejora de la actividad fotosintética (funcionamiento de los estomas y del fotosistema II), así como una regulación de la temperatura interna de la hoja (<30°C) y contenido relativo de agua (retención de agua >30%).

En un estudio similar, Bokhari *et al.* (2019) aislaron cepas de *Bacillus* epífitas de plantas que crecen en el desierto de Thar de Pakistán, y estudiaron su capacidad de resistencia al estrés por sal y calor, así como actividad promotora del crecimiento en plantas de *Arabidopsis thaliana*. Los resultados de ensayos *in vitro* demostraron que las cepas fueron capaces de fijar

nitrógeno y solubilizar fósforo y óxido de zinc, así como de producir ácido indol-3-acético (IAA) y sideróforos (*i.e.* bacililbactina). Además, las bacterias pudieron crecer en condiciones de estrés salino (NaCl, 1.5 M o 2 M, respectivamente) y por calor (hasta 50°C). Asimismo, las cepas demostraron mejorar de manera significativa el crecimiento de plántulas de *A. thaliana*, al aumentar (~50%) su peso fresco en comparación con las plántulas no inoculadas sometidas a condiciones de estrés salino (NaCl, 100 mM).

Finalmente, en un trabajo llevado a cabo por ALKahtani *et al.* (2020), se aislaron e identificaron comunidades bacterianas de dos plantas nativas (*Fagonia mollis* Delile y *Achillea fragrantissima* (Forssk) Sch. Bip.) del desierto de Sinaí en Egipto. En particular, se caracterizaron sus rasgos promotores de crecimiento en plantas de maíz (*Zea mays* L. var. Single Cross Pioneer 30K08) cultivadas bajo condiciones de invernadero. Los aislados estuvieron representados por los géneros *Bacillus*, *Paenibacillus* y *Brevibacillus*. La detección *in vitro* de rasgos que promueven el crecimiento demostró que las bacterias tienen la capacidad de producir enzimas extracelulares (amilasa, celulasa, proteasa, pectinasa y xilanasas), amoníaco y ácido indol-3-acético (IAA) (hasta 5 mg ml⁻¹), así como de solubilizar fósforo. Por lo que se refiere al experimento de invernadero, la inoculación con las bacterias tuvo efectos positivos significativos ya que las plantas inoculadas presentaron un incremento del 35 y 25% en el peso seco de los brotes y raíces, y del 150, 227 y 37% en el contenido de fósforo, nitrógeno y potasio, respectivamente, en comparación con las plantas sin inocular.

Agentes de biocontrol

En la naturaleza, las plantas pueden ser susceptibles a la infección por organismos patógenos como hongos, bacterias, virus, protozoos, así como insectos y parásitos. La acción de éstos puede causar enfermedades que alteran los procesos fisiológicos de las plantas y afectar el rendimiento de los cultivos y la eficiencia económica (Nazarov *et al.*, 2020). Un enfoque para hacer frente a dichas enfermedades es el control biológico, que hace referencia a la supresión de microorganismos patógenos mediante la acción de organismos vivos (Köhl *et al.*, 2019). En este sentido, se ha reportado que algunas bacterias pueden proteger a los cultivos de los daños causados

por patógenos a través de diferentes modos de acción como la i) interacción antagonista directa, ii) competencia indirecta por los nutrientes y el espacio, iii) producción de metabolitos secundarios antimicrobianos, iv) secreción de enzimas líticas, entre otros (Mota *et al.*, 2017).

Como ejemplo, El-Sayed *et al.* (2014) aislaron bacterias epífitas de varias especies de plantas nativas y silvestres de Almadinah Almunawara (zona árida de Arabia Saudita). Los autores evaluaron *in vitro* su potencial actividad antagonista contra hongos fitopatógenos y nematodos. También identificaron rasgos específicos asociados a la promoción de crecimiento. Los resultados revelaron que la composición taxonómica de los aislados bacterianos estuvo representada por los géneros *Bacillus*, *Enterobacter* y *Pseudomonas*. Asimismo, se encontró que las bacterias exhibieron capacidades para fijar nitrógeno, solubilizar fósforo y zinc, y producir amoniaco, enzimas líticas (proteasa, quitinasa y celulasa), ácido indol-3-acético (IAA) y sideróforos. Adicionalmente, mostraron la capacidad de inhibir el crecimiento de los hongos *Fusarium oxysporum* (50%) y *Sclerotinia sclerotiorum* (71%), y huevos (81%) y nematodos juveniles (100%) de *Meloidogyne incognita*.

En un estudio similar llevado a cabo por Boukaya *et al.* (2018) se evaluó *in vitro* la capacidad de actinobacterias (*Streptosporangium becharense*, *Streptosporangium saharense*, *Streptomyces cyaneofuscatus*, *Streptomyces mutabilis*, entre otras), aisladas de plantas nativas del desierto de Sahara (ecorregión de Argelia), en el control biológico y regulación de la enfermedad de la pudrición de la raíz causada por hongos fitopatógenos, y su promoción de crecimiento en plantas de trigo. Los resultados mostraron que las bacterias tenían actividad antagónica contra *Fusarium culmorum*, *F. graminearum*, *F. oxysporum*, *Rhizoctonia solani* y *Bipolaris sorokiniana*, así como la capacidad para producir ácido cianhídrico, sideróforos, quitinasa y ácido indol-3-acético (IAA), y solubilización de fósforo.

Además, se observó que el índice de severidad de pudrición de la raíz disminuyó significativamente (de 77% a 16%) en los tratamientos inoculados, comparado con las semillas de trigo sin tratar, y que la inoculación con bacterias tuvo un mayor efecto protector que el tratamiento químico (Dividend®). Se destaca también que hubo un aumento significativo en la longitud de los brotes y raíces (300 y 260%, respectivamente), y el peso seco de las plantas (600%).

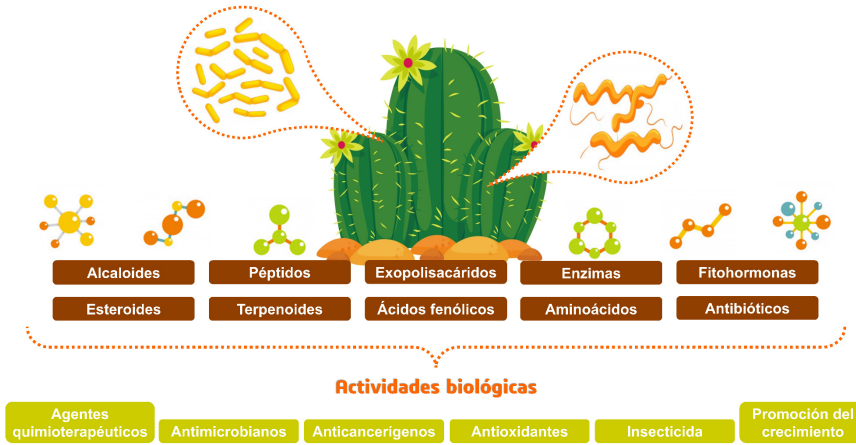
Recientemente, AbdelRazek y Yaseen (2020) estudiaron la capacidad antagonica de bacterias (*Paenibacillus amylolyticus*, *Brevibacillus agri*, *Gluconobacter frateurii*, *Beijerinckia mobilis*, *Achromobacter aloeverae* y *Pseudomonas stutzeri*) aisladas de plantas nativas del desierto de Sinaí del Norte y El Cairo (Egipto) contra *M. incognita*. Los experimentos de biocontrol *in vitro* en condiciones de invernadero, usando como planta modelo berenjena, mostraron que los cultivos bacterianos redujeron la mortalidad de *M. incognita* en un 100%, después de 48 h de exposición. Por otra parte, se redujo la presencia de agallas (80%), hembras (80%), huevecillos (70%), población final (75%) y tasa de acumulación de nematodos (79%), en comparación con el tratamiento control. De manera adicional, las bacterias presentaron capacidades para producir cianuro de hidrógeno, sideróforos, quitinasa, proteasa y IAA, así como solubilización de fósforo. Estos rasgos promotores del crecimiento se vieron reflejados en el aumento de la longitud (38.15%), peso fresco (169.7%) y peso seco (220.9%) de brotes de berenjena.

Otras aplicaciones (producción de compuestos bioactivos, cultivos probióticos)

El interés por la búsqueda de nuevos metabolitos secundarios, producidos por microorganismos, continúa aumentando debido a sus múltiples actividades biológicas, así como sus potenciales aplicaciones agrícolas, farmacéuticas e industriales (Singh *et al.*, 2017). Entre los distintos microorganismos encontrados en hábitats inusuales, como los desiertos, las bacterias han demostrado producir compuestos únicos, novedosos y con interesantes estructuras químicas y actividades biológicas (figura 2; Mohammadipannah y Wink, 2016).

Adicionalmente, la capacidad para crecer y sobrevivir en hábitats ácidos, salinos y con temperaturas altas de algunas bacterias epífitas de plantas les permite considerarlas como posibles candidatos para su uso como cultivos iniciadores o con características probióticas (Khan *et al.*, 2018). Debido a que el nivel de investigaciones enfocadas al empleo de bacterias epífitas de plantas desérticas, para la producción de compuestos bioactivos o como cultivos probióticos aún no es lo suficientemente extensa, se describirán las más representativas en el campo.

FIGURA 2



Compuestos secundarios sintetizados por bacterias epífitas de plantas desérticas.
Fuente: Adaptada de la descripción hecha por Mohammadipannah y Wink (2016).

En un primer acercamiento prospectivo para la potencial producción de compuestos antimicrobianos, se aislaron bacterias endófitas de la planta *Plectranthus tenuiflorus* (originaria del desierto de Arabia Saudita), y se evaluó su actividad antimicrobiana contra algunos patógenos humanos (El-Deeb *et al.*, 2013). La diversidad e identificación de los aislados mostró que la comunidad bacteriana estaba representada por los géneros *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Micrococcus*, *Pseudomonas* y *Acinetobacter*. El sobrenadante libre de células de estas bacterias presentó actividad antibacteriana y antifúngica significativa contra *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Streptococcus agalactiae*, *Proteus mirabilis* y *Candida albicans*.

Por otro lado, en un estudio realizado por Verón *et al.* (2017), se aislaron bacterias epífitas del fruto de *Opuntia ficus-indica*, una cactácea que crece en regiones áridas de Argentina. Los autores evaluaron sus potenciales propiedades probióticas, así como su capacidad para fermentar una bebida de jugo de cactus. El análisis filogenético reveló la presencia de *Lactobacillus plantarum* y *Fructobacillus fructosus*. Dichas bacterias mostraron propiedades probióticas como tolerancia a condiciones gastrointestinales simuladas (pH bajos= 2 y 3, y altas concentraciones de sales

biliares = 0.3 a 1.0%), propiedades indirectas de colonización (hidrofobicidad superficial de membrana= 64%, y autoagregación= 61%), actividad feruloil esterasa (liberación de moléculas que presentan actividad antioxidante) y antimicrobiana (inhibición de *Bacillus* sp.).

Asimismo, se registró un aumento significativo del contenido total de compuestos fenólicos (808 mg equivalentes ácido gálico-EAG L⁻¹), actividad antioxidante (concentración media inhibitoria (IC₅₀) = 5.7 mg EAG L⁻¹), capacidad acidificante (pH de hasta 2.5) y actividad antimicrobiana *in situ* (inhibición de *Bacillus* sp. inoculado en el jugo), tras la fermentación del jugo de cactus con las bacterias potencialmente probióticas.

En un estudio relacionado, Nithya *et al.* (2018) aislaron actinobacterias a partir de plantas nativas del desierto de Arabia Saudita. Los autores determinaron su potencial actividad antimicrobiana, con énfasis en la purificación y caracterización de un nuevo metabolito antimicrobiano de clase alcaloide. La cepa identificada como *Streptomyces* sp. DA3-7 destacó por su capacidad de producir metabolitos extracelulares con actividad antimicrobiana y antifúngica, ya que su extracto crudo libre de células exhibió actividad antagonica contra *Enterococcus faecalis* (0.078 mg ml⁻¹), *Salmonella typhimurium* (0.156 mg ml⁻¹), *K. pneumoniae* (0.312 mg ml⁻¹), *E. coli* (0.312 mg ml⁻¹), *Proteus vulgaris* (0.312 mg ml⁻¹), *Pseudomonas aeruginosa* (0.312 mg ml⁻¹) y *S. aureus* (0.312 mg ml⁻¹). Además, mostró actividad citotóxica (IC₅₀= 85 µg ml⁻¹) contra células de adenocarcinoma de mama MCF-7. Los compuestos del extracto crudo de DA3-7 se purificaron y caracterizaron, y se identificó a la Piridina-2,5-diacetamida (alcaloide de piridina, C₉H₁₁N₃O₂ + H⁺, 194.21 Da) como el principal compuesto activo.

Finalmente, se exploró el potencial de actinobacterias endofíticas de psamófitos (plantas nativas del desierto de Taklamakan, China) para producir metabolitos secundarios con actividad antimicrobiana (Wang *et al.*, 2021). El análisis taxonómico reveló que los aislados estuvieron principalmente representados por los géneros *Streptomyces*, *Curtobacterium*, *Brachybacterium*, *Leucobacter*, *Microbacterium*, *Labeledella*, *No-cardiopsis* y *Amycolatopsis*. Sin embargo, sólo las cepas de *Streptomyces* mostraron actividad antagonica de amplio espectro contra *E. faecalis*, *S. aureus*, *K. pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *P. aeruginosa* y *E. coli*.

A partir del medio de cultivo libre de células de las cepas de *Streptomyces*, se aislaron e identificaron dos nuevos antibióticos de tipo estreptogramina (macrólidos): acetil-griseoviridina y griseoviridina desulfurizante.

CONCLUSIONES Y TENDENCIAS FUTURAS

En los últimos años, el interés por el aislamiento, identificación y caracterización de nuevos microorganismos a partir de hábitats inexplorados, en particular de entornos desérticos, ha ido en aumento. Concretamente, los datos microbiológicos y funcionales extraídos de la literatura actual sobre la prospección de bacterias epífitas de plantas brindan un fuerte respaldo a la premisa de que las duras condiciones ambientales que prevalecen en los desiertos conllevan a la selección de microorganismos que expresan una “nueva genética”. Esto se ve reflejado en la variación de las características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas y moleculares de las bacterias. Por tanto, la posibilidad para explotar estas características únicas abre oportunidades en el desarrollo de potenciales aplicaciones biotecnológicas con fines agrícolas, ambientales e industriales. Sin embargo, la evidencia científica acumulada aún es limitada, lo que evidencia la indiscutible necesidad de desarrollar investigaciones avanzadas y bien articuladas para explorar y explotar a fondo la abundancia, diversidad o incluso la plasticidad y función de estas bacterias.

Con base en el conocimiento de la literatura revisada, y de acuerdo con distintos especialistas (Gopal y Gupta, 2018; Sivakumar *et al.*, 2020; Thapa y Prasanna, 2018), los esfuerzos de las investigaciones futuras deben centrarse en los siguientes aspectos:

1. Realizar experimentos *in vitro* e *in vivo* para mejorar la comprensión de las comunicaciones bacterianas y su rol en la colonización del ecosistema circundante.
2. Comprender los mecanismos por los cuales presentan una función estimulante en la planta huésped y su posible acción a largo plazo.
3. Realizar estudios genómicos, proteómicos, transcriptómicos y metabolómicos, junto con herramientas bioinformáticas, para

adquirir conocimiento de aquellos genes presentes en las bacterias que les confieren plasticidad funcional.

4. Documentar los mecanismos implicados en algunas interacciones específicas como interacciones bacteria-huésped, bacteria-zona geográfica, bacteria-estación climática y bacteria-patógenos.
5. Evaluar el potencial industrial de las bacterias y su valor comercial.

REFERENCIAS

- ABDELRAZEK, G. M., y Yaseen, R. (2020). "Effect of some rhizosphere bacteria on root-knot nematodes", *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30, 140.
- AFZAL, I., Shinwari, Z. K., Sikandar, S., y Shahzad, S. (2019). "Plant beneficial endophytic bacteria: mechanisms, diversity, host range and genetic determinants", *Microbiological Research*, 221, 36-49.
- ALKAHTANI, M. D. F., Fouda, A., Attia, K. A., Al-Otaibi, F., Eid, A. M., Ewais, E. E.-D., Hijri, M., St-Arnaud, M., El-Din Hassan, S., Khan, N., Hafez, Y. M., y Abdelaal, K. A. A. (2020). "Isolation and characterization of plant growth promoting endophytic bacteria from desert plants and their application as bioinoculants for sustainable agriculture", *Agronomy*, 10(9), 1325.
- ALSHARIF, W., Saad, M. M., y Hirt, H. (2020). "Desert microbes for boosting sustainable agriculture in extreme environments", *Frontiers in Microbiology*, 11, 1666.
- BASHIR, I., War, A. F., Rafiq, I., Reshi, Z. A., Rashid, I., y Shouche, Y. S. (2022). "Phyllosphere microbiome: diversity and functions", *Microbiological Research*, 254, 126888.
- BOKHARI, A., Essack, M., Lafi, F. F., Andres-Barrao, C., Jalal, R., Alamoudi, S., Razali, R., Alzubaidy, H., Shah, K. H., Siddique, S., Bajic, V. B., Hirt, H., y Saad, M. M. (2019). "Bioprospecting desert plant *Bacillus* endophytic strains for their potential to enhance plant stress tolerance", *Scientific Reports*, 9, 18154.
- BOUKAYA, N., Goudjal, Y., Zamoum, M., Chaabane Chaouch, F., Sabaou, N., Mathieu, F., y Zitouni, A. (2018). "Biocontrol and

plant-growth-promoting capacities of actinobacterial strains from the Algerian Sahara and characterisation of *Streptosporangium becharensense* SG1 as a promising biocontrol agent”, *Biocontrol Science and Technology*, 28(9), 858-873.

- CHERIF, A., Tsiamis, G., Compant, S., y Borin, S. (2015). “Biodesert: exploring and exploiting the microbial resource of hot and cold deserts”, *BioMed Research International*, 2015, 289457.
- CHIMWAMUROMBE, P. M., Grönemeyer, J. L., y Reinhold-Hurek, B. (2016). “Isolation and characterization of culturable seed-associated bacterial endophytes from gnotobiotically grown Marama bean seedlings”, *FEMS Microbiology Ecology*, 92(6), fw083.
- COLEMAN-DERR, D., Desgarennes, D., Fonseca-Garcia, C., Gross, S., Clingenpeel, S., Woyke, T., North, G., Visel, A., Partida-Martinez, L. P., y Tringe, S. G. (2016). “Plant compartment and biogeography affect microbiome composition in cultivated and native *Agave* species”, *New Phytologist*, 209(2), 798-811.
- COMPANT, S., Samad, A., Faist, H., y Sessitsch, A. (2019). “A review on the plant microbiome: ecology, functions and emerging trends in microbial application”, *Journal of Advanced Research*, 19, 29-37.
- DASTOGEER, K. M. G., Tumpa, F. H., Sultana, A., Akter, M. A., y Chakraborty, A. (2020). “Plant microbiome—an account of the factors that shape community composition and diversity”, *Current Plant Biology*, 23, 100161.
- EIDA, A. A., Ziegler, M., Lafi, F. F., Michell, C. T., Voolstra, C. R., Hirt, H., y Saad, M. M. (2018). “Desert plant bacteria reveal host influence and beneficial plant growth properties”, *PLoS ONE*, 13(12), e0208223.
- EKE, P., Kumar, A., Sahu, K. P., Wakam, L. N., Sheoran, N., Ashjayothi, M., Patel, A., y Fekam, F. B. (2019). “Endophytic bacteria of desert cactus (*Euphorbia trigonas* Mill) confer drought tolerance and induce growth promotion in tomato (*Solanum lycopersicum* L.)”, *Microbiological Research*, 228, 126302.
- EL-DEEB, B., Fayez, K., y Gherbawy, Y. (2013). “Isolation and characterization of endophytic bacteria from *Plectranthus tenuiflorus* medicinal plant in Saudi Arabia desert and their antimicrobial activities”, *Journal of Plant Interactions*, 8(1), 56-64.

- EL-SAYED, W. S., Akhkha, A., El-Naggar, M. Y., y Elbadry, M. (2014). “*In vitro* antagonistic activity, plant growth promoting traits and phylogenetic affiliation of rhizobacteria associated with wild plants grown in arid soil”, *Frontiers in Microbiology*, 5, 651.
- ETESAMI, H., y Maheshwari, D. K. (2018). “Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: action mechanisms and future prospects”, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 156, 225-246.
- FARIA, M. R. de, Costa, L. S. A. S., Chiaramonte, J. B., Bettiol, W., y Mendes, R. (2021). “The rhizosphere microbiome: functions, dynamics, and role in plant protection”, *Tropical Plant Pathology*, 46, 13-25.
- FLORES-NÚÑEZ, V. M., Fonseca-García, C., Desgarenes, D., Eloie-Fadros, E., Woyke, T., y Partida-Martínez, L. P. (2020). “Functional signatures of the epiphytic prokaryotic microbiome of agaves and cacti”, *Frontiers in Microbiology*, 10, 3044.
- FRANKLIN, K. A., Sommers, P. N., Aslan, C. E., López, B. R., Bronstein, J. L., Bustamante, E., Búrquez, A., Medellín, R. A., y Marazzi, B. (2016). “Plant biotic interactions in the Sonoran Desert: current knowledge and future research perspectives”, *International Journal of Plant Sciences*, 177(3), 217-234.
- GOPAL, M., y Gupta, A. (2018). “Building plant microbiome vault: a future biotechnological resource”, *Symbiosis*, 77, 1-8.
- HASSANI, M. A., Durán, P., y Hacquard, S. (2018). “Microbial interactions within the plant holobiont”, *Microbiome*, 6(1):58.
- KHAN, R., Khan, M. I., Zeb, A., Roy, N., Yasir, M., Khan, I., Qazi, J. I., Ahmad, S., Ullah, R., y Bhutto, Z. (2018). “Prokaryotic diversity from extreme environments of Pakistan and its potential applications at regional levels”, *bioRxiv*, 2018, 342949.
- KÖHL, J., Kolnaar, R., y Ravensberg, W. J. (2019). “Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: relevance beyond efficacy”, *Frontiers in Plant Science*, 10, 845.
- KUMAR, J., Singh, D., Ghosh, P., y Kumar, A. (2017). “Endophytic and epiphytic modes of microbial interactions and benefits”, en D. P. Singh, H. B. Singh, y R. Prabha (eds.), *Plant-microbe interactions*

in agro-ecological perspectives. Singapur: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 227-253.

- LI, J., Wang, C., Liang, W., y Liu, S. (2021). "Rhizosphere microbiome: the emerging barrier in plant-pathogen interactions", *Frontiers in Microbiology*, 12, 772420.
- LI, Y., Cheng, C., y An, D. (2017). "Characterisation of endophytic bacteria from a desert plant *Lepidium perfoliatum* L", *Plant Protection Science*, 53(1), 32-43.
- MAKHALANYANE, T. P., Valverde, A., Gunnigle, E., Frossard, A., Ramond, J.-B., y Cowan, D. A. (2015). "Microbial ecology of hot desert edaphic systems", *FEMS Microbiology Reviews*, 39(2), 203-221.
- MARASCO, R., Mosqueira, M. J., Fusi, M., Ramond, J.-P., Merlino, G., Booth, J. M., Maggs-Kölling, G., Cowan, D. A., y Daffonchio, D. (2018). "Rhizosphere microbial community assembly of sympatric desert speargrasses is independent of the plant host", *Microbiome*, 6, 215.
- MCAART, S. H., Koch, H., Irwin, R. E., y Adler, L. S. (2014). "Arranging the bouquet of disease: floral traits and the transmission of plant and animal pathogens", *Ecology Letters*, 17(5), 624-636.
- MOHAMMADIPANAH, F., y Wink, J. (2016). "Actinobacteria from arid and desert habitats: diversity and biological activity", *Frontiers in Microbiology*, 6, 1541.
- MOTA, M. S., Gomes, C. B., Souza Júnior, I. T., y Moura, A. B. (2017). "Bacterial selection for biological control of plant disease: criterion determination and validation", *Brazilian Journal of Microbiology*, 48(1), 62-70.
- MUKHTAR, S., Mehnaz, S., y Malik, K. A. (2021). "Comparative study of the rhizosphere and root endosphere microbiomes of Cholistan Desert plants", *Frontiers in Microbiology*, 12, 618742.
- NAZAROV, P. A., Baleev, D. N., Ivanova, M. I., Sokolova, L. M., y Karakozova, M. V. (2020). "Infectious plant diseases: etiology, current status, problems and prospects in plant protection.", *Acta Naturae*, 12(3), 46-59.
- NELSON, E. B. (2018). "The seed microbiome: origins, interactions, and impacts", *Plant Soil*, 422, 7-34.

- NITHYA, K., Muthukumar, C., Biswas, B., Alharbi, N. S., Kadaikunnan, S., Khaled, J. M., y Dhanasekaran, D. (2018). "Desert actinobacteria as a source of bioactive compounds production with a special emphases on Pyridine-2,5-diacetamide a new pyridine alkaloid produced by *Streptomyces* sp. DA3-7", *Microbiological Research*, 207, 116-133.
- PARASURAMAN, P., Pattnaik, S., y Busi, S. (2019). "Phyllosphere microbiome: Functional importance in sustainable agriculture", en J. S. Singh y D. P. Singh (eds.), *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering: microbial biotechnology in agro-environmental sustainability*. Ámsterdam: Elsevier, 135-148.
- REBOLLEDA-GÓMEZ, M., Forrester, N. J., Russell, A. L., Wei, N., Fetters, A. M., Stephens, J. D., y Ashman, T. (2019). "Gazing into the anthosphere: considering how microbes influence floral evolution", *New Phytologist*, 224, 1012-1020.
- SAAD, M. M., Eida, A. A., y Hirt, H. (2020). "Tailoring plant-associated microbial inoculants in agriculture - A roadmap for successful application", *Journal of Experimental Botany*, 71(13), 3878-3901.
- SÁNCHEZ-CAÑIZARES, C., Jorrín, B., Poole, P. S., y Tkacz, A. (2017). "Understanding the holobiont: the interdependence of plants and their microbiome", *Current Opinion in Microbiology*, 38, 188-196.
- SCHLECHTER, R. O., Miebach, M., y Remus-Emsermann, M. N. P. (2019). "Driving factors of epiphytic bacterial communities: a mini-review", *Journal of Advanced Research*, 19, 57-65.
- SCHOLES, R. J. (2020). "The future of semi-arid regions: a weak fabric unravels", *Climate*, 8(3), 43.
- SINGH, M., Kumar, A., Singh, R., y Pandey, K. D. (2017). "Endophytic bacteria: a new source of bioactive compounds", *3 Biotech*, 7(5): 315.
- SIVAKUMAR, N., Sathishkumar, R., Selvakumar, G., Shyamkumar, R., y Arjunekumar K. (2020). "Phyllospheric microbiomes: diversity, ecological significance, and biotechnological applications", en A. Yadav, J. Singh, A. Rastegari, y N. Yadav (eds.), *Plant microbiomes for sustainable agriculture sustainable development and biodiversity*. Berlín: Springer Science+Business Media, 113-172.

- SOUSSI, A., Ferjani, R., Marasco, R., Guesmi, A., Cherif, H., Rolli, E., Mapelli, F., Ouzari, H. I., Daffonchio, D., y Cherif, A. (2016). “Plant-associated microbiomes in arid lands: diversity, ecology and biotechnological potential”, *Plant and Soil*, 405(1-2), 357-370.
- STONE, B. W. G., Weingarten, E. A., y Jackson, C. R. (2018). “The role of the phyllosphere microbiome in plant health and function”, *Annual Plant Reviews*, 1, 533-556.
- SUN, Y., Wang, C., Chen, H. Y.-H., y Ruan, H. (2020). “Response patterns and mechanisms of plants to water stress”, *BioRxiv*, 2020, 973610.
- THAPA, S., y Prasanna, R. (2018). “Prospecting the characteristics and significance of the phyllosphere microbiome”, *Annals of Microbiology*, 68(5), 229-245.
- TURNER, T. R., James, E. K., y Poole, P. S. (2013). “The plant microbiome”, *Genome Biology*, 14, 209.
- VANDENKOORNHUYSE, P., Quaiser, A., Duhamel, M., Le Van, A., y Dufresne, A. (2015). “The importance of the microbiome of the plant holobiont”, *New Phytologist*, 206(4), 1196-1206.
- VÁSQUEZ-DEAN, J., Maza, F., Morel, I., Pulgar, R., y González, M. (2020). “Microbial communities from arid environments on a global scale. A systematic review”, *Biological Research*, 53, 29.
- VEJAN, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., y Nasrullah Boyce, A. (2016). “Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—A review”, *Molecules*, 21(5), 573.
- VERÓN, H. E., Di Risio, H. D., Isla, M. I., y Torres, S. (2017). “Isolation and selection of potential probiotic lactic acid bacteria from *Opuntia ficus-indica* fruits that grow in Northwest Argentina”, *LWT-Food Science and Technology*, 84, 231-240.
- WANG, T., Li, F., Lu, Q., Wu, G., Jiang, Z., Liu, S., ... y Sun, C. (2021). “Diversity, novelty, antimicrobial activity, and new antibiotics of cultivable endophytic actinobacteria isolated from psammophytes collected from Taklamakan Desert”, *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 11(2), 241-250.
- ZHANG, L., Zhang, W., Li, Q., Cui, R., Wang, Z., Wang, Y., Zhang, Y.-Z., Ding, W., y Shen, X. (2020). “Deciphering the root endosphere microbiome of the desert plant *Alhagi sparsifolia* for drought

resistance-promoting bacteria”, *Applied and Environmental Microbiology*, 86, e02863-19.

ZHANG, Q., Acuña, J. J., Inostroza, N. G., Mora, M. L., Radic, S., Sadowsky, M. J., y Jorquera, M. A. (2019). “Endophytic bacterial communities associated with roots and leaves of plants growing in Chilean extreme environments”, *Scientific Reports*, 9(1), 4950.

CAPÍTULO 8
POBLACIONES SILVESTRES DE
CAPSICUM ANNUUM VAR. *GLABRIUSCULUM*
CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES
Y ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN

MARTÍN ESQUEDA¹
ALDO GUTIÉRREZ¹
MARTHA L. CORONADO²
OSIRIS ÁLVAREZ-BAJO³
GEORGINA VARGAS¹

RESUMEN

Las poblaciones silvestres de chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) se encuentran sobre-aprovechadas, por lo que es necesario brindar alternativas sostenibles. Se estudiaron los factores bióticos y abióticos de esta especie en sitios naturales de Sonora con vegetación de pastizal, matorral subtropical, selva baja caducifolia y bosque bajo abierto. La altitud de las localidades varió de 297 hasta 1,138 m s.n.m., mientras que la altura y el diámetro promedio de los especímenes de 1.21 a 1.77 y 0.81 a 1.43 m, respectivamente. Los suelos corresponden al tipo feozem, litosol y regosol. Se observó principalmente asociada con *Havardia mexicana*, *Prosopis velutina* y *Vachellia farnesiana*. El análisis de componentes principales mostró que cuatro factores explican el 70 % de la variabilidad de los datos. En los parámetros edáficos resultaron importantes la relación de adsorción de sodio y el contenido de azufre; con relación a topografía, altitud; en clima, la temperatura y precipitación; en ecología, el tipo de

¹ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas 46, La Victoria, 83304 Hermosillo, Sonora, México.

² Universidad Estatal de Sonora, Ave. Ley Federal del Trabajo s/n, 83100 Hermosillo, Sonora, México.

³ Cátedra Conacyt-Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, 83000 Hermosillo, Sonora, México.

vegetación y nodriza. Los resultados coadyuvaron a definir un protocolo de trasplante holístico en poblaciones silvestres de chiltepín. Una alianza tripartita entre los productores locales, el sector académico (I+D) y el gobierno facilitaría el desarrollo de estrategias para un aprovechamiento sostenible en áreas naturales.

PALABRAS CLAVE: Chiltepín, componentes principales, factores limitantes, nodricismo, vegetación.

INTRODUCCIÓN

El ancestro más cercano de los chiles cultivados a nivel mundial es *Capsicum annum* var. *glabriusculum* (Dunal) Heiser & Pickersgill (*Cag*), conocido popularmente como “chiltepín”, “chile piquín” o “chile amas-hito”, entre otros nombres que recibe en México. Aunque representa un ícono entre los chiles a nivel Mesoamérica, aún no está domesticado (Kraft *et al.*, 2013; Pickersgill, 2016; Qin *et al.*, 2014). Se encuentra ampliamente distribuido en toda la zona costera, de Sonora a Chiapas por el Pacífico y de Tamaulipas a la Península de Yucatán, por el Golfo de México, desde el sur de Estados Unidos hasta el noroeste de Sudamérica (González-Jara *et al.*, 2011). En Sonora se observa con mayor frecuencia en municipios cercanos a la sierra, en la parte norte, centro y sur. Las regiones chiltepineras más importantes de Sonora, se ubican en el Río Sonora y la Sierra de Álamos, donde se recolecta de manera exhaustiva de septiembre a noviembre (Bañuelos *et al.*, 2008).

El chiltepín es un arbusto perenne, semileñoso, con una forma de crecimiento erecta, postrada e incluso enredadera de hasta cinco metros (Hernández-Verdugo *et al.*, 2012). La madurez reproductiva ocurre entre los 6 y 10 meses de edad, florece entre mayo y agosto, y fructifica de junio a octubre, formando una baya redonda u oblonga de 4–8 mm de diámetro, la cual inicialmente es verde y al madurar se torna rojo naranja o rojo intenso; ambas son aprovechadas y comercializadas. El uso principal es alimenticio; sin embargo, tiene aplicaciones medicinales y ceremoniales entre algunos grupos indígenas de la Sierra de Sonora, considerándolo símbolo de valentía, hombría, fortaleza y coraje (Bañuelos *et al.*, 2008). En el noreste de México, el chiltepín también es una especie importante en el matorral espinoso Tamaulipeco, donde grupos marginados lo recolectan para consumo y comercialización, generando ingresos considerables a la economía familiar, representando un mercado potencial, al igual que en Sonora. Debido a la falta de organización de los recolectores es difícil cumplir con las exigencias de FDA y USDA para su exportación a Norteamérica; afortunadamente, los espacios regionales son menos restrictivos con una demanda creciente y precios atractivos (Robles y Garza, 2015).

En el marco ecológico tiene relaciones complejas a través de las micorrizas arbusculares, con la formación de redes de interacción microbioma-planta con alto potencial de especificidad y plasticidad, las cuales favorecen la transferencia de nutrientes entre plantas facilitadoras y facilitadas (Jiménez-Leyva *et al.*, 2017; Montesinos-Navarro *et al.*, 2016). El fruto representa una fuente de alimento para aves; asimismo, las semillas al pasar por su tracto digestivo pierden los compuestos que inhiben su germinación, facilitándose el establecimiento de las plántulas, preferentemente en microambientes bajo el dosel de diversas especies de árboles y arbustos (Noss y Levey, 2014).

El chiltepín está incluido en la lista global de especies prioritarias de Parientes Silvestres de Cultivos (PSC) para programas de conservación, debido a su diversidad genética como resultado de la presión de selección natural, acentuada por el cambio climático. Su germoplasma resulta útil para desarrollar cultivos más resistentes a sequía, temperatura extrema y enfermedades, así como mejorar la productividad y la calidad nutritiva (Maxted *et al.*, 2013). Sin embargo, la mayoría de los PSC están amenazados por las actividades antropogénicas como la agricultura, ganadería, minería, infraestructura urbana y contaminación, entre otros (Castañeda-Álvarez *et al.*, 2016; Pickersgill, 2016). Particularmente en Sonora, las poblaciones silvestres de *Cag* están en riesgo debido a un sobre aprovechamiento y métodos inadecuados de recolección de los frutos, pastoreo de ganado, sequía y temperatura extrema. En la región Huasteca de México existe riesgo de pérdida de riqueza genética del chile silvestre, en parte debido a que la mayoría de los campesinos cortan ramas de la planta para facilitar la cosecha, dañándola drásticamente y provocando en muchas ocasiones su muerte (Ramírez-Meraz *et al.*, 2015).

La disminución de la diversidad genética y el aumento de enfermedades sobre todo causadas por virus, se encuentran entre los principales retos que afronta el cultivo de *Cag*. El conocimiento y la conservación de *Cag* es importante como reservorio de genes con los procesos evolutivos naturales de las poblaciones y tienen potencial para solucionar problemas agrícolas futuros (Hayano-Kanashiro *et al.*, 2016). Por ello, el desarrollo de estrategias holísticas para un aprovechamiento sostenible de las poblaciones silvestres es fundamental. Se requieren criterios sólidos para promover prácticas específicas, según las necesidades y las prioridades

por región (Zhang *et al.*, 2017). De igual forma, la investigación básica sobre los factores bióticos y abióticos que limitan la distribución de la especie debe abordarse a nivel de tipo de vegetación, comunidad, ecosistema y bioma.

ÁREA DE ESTUDIO

Con la finalidad de caracterizar las condiciones ambientales de poblaciones silvestres de *Cag*, se muestrearon nueve localidades de tres municipios comprendidas en el área de distribución natural e importantes en la producción de chiltepín: Álamos, Bacadéhuachi y Baviácora, Sonora (cuadro 1). El recorrido de prospección para la definición de los sitios se hizo con la ayuda de recolectores del lugar. Se determinó la latitud, longitud y altitud con un geoposicionador; se utilizaron cartas temáticas y mapas digitales en cuanto a fisiografía, geología, clima, hidrología y edafología emitidos por INEGI. Se tomaron muestras compuestas *in situ* para el análisis físico y químico de suelos: pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, textura, relación de adsorción de sodio, porcentaje de sodio intercambiable, nitrógeno, fósforo, potasio, entre otros.

CUADRO 1
POBLACIONES SILVESTRES ESTUDIADAS DE
CAPSICUM ANNUUM VAR. *GLABRIUSCULUM* EN SONORA

Localidad	Latitud N	Longitud O	Altitud (m s.n.m.)	Vegetación
<i>Municipio de Álamos</i>				
I. Los Josos 1	27°12'42.77"	108°52'46.20"	271	SBC+T
II. Los Josos 2	27°11'12.34"	108°54'55.55"	273	SBC+T
III. Buenos Aires	27°11'22.09"	108°54'37.04"	350	SBC+T
<i>Municipio de Bacadéhuachi</i>				
IV. La Palmita	29°48'13.82"	109°03'59.11"	949	PN
V. La Morita	29°48'18.39"	109°02'51.72"	1116	PN
VI. Los Cuates	29°47'21.16"	109°03'17.39"	1138	BBA

CUADRO 1

POBLACIONES SILVESTRES ESTUDIADAS DE
CAPSICUM ANNUUM VAR. *GLABRIUSCULUM* EN SONORA

(continuación)

Localidad	Latitud N	Longitud O	Altitud (m s.n.m.)	Vegetación
<i>Municipio de Baviácora</i>				
VII. La Cieneguita	29°32'06.94"	110°00'24.26"	1039	MS
VIII. La Montosa 1	29°34'16.54"	109°58'13.69"	940	BBA
IX. La Montosa 2	29°33'49.89"	109°59'21.12"	1021	PI

Vegetación = BBA: Bosque bajo abierto; MS: Matorral subtropical; PI: Pastizal inducido; PN: Pastizal natural; SBC+T: Selva baja caducifolia mezclada con terrenos de temporal.

Fuente:

El tipo de vegetación se definió con base en la clasificación del INEGI. Se obtuvo la composición florística y el valor de importancia de las especies del estrato arbóreo y arbustivo, determinando su densidad, frecuencia y cobertura relativa, para establecer la estructura de la vegetación. El método de muestreo varió según el área, siendo parcelas rectangulares (25×2 m), cuadrantes (20×20 m) o el vecino más cercano; se registraron las dimensiones de las plantas incluido *Cag*. Las muestras de los especímenes se preservaron en una prensa botánica para su posterior identificación. Con el análisis de vegetación se estimó la población total, abundancia y distribución de *Cag* tanto en la zona núcleo (área con mayor presencia de especímenes de *Cag* y grado de conservación de la población silvestre) como en la zona colindante (área que rodea al sitio prioritario).

FACTORES ABIÓTICOS

Con relación a la fisiografía se encontró que Álamos forma parte de la subprovincia Pie de Sierra, caracterizada por sierras y lomeríos similares en litología a la Sierra Madre Occidental, pero además presentan granito y otras rocas metamórficas. El sistema de topofomas es poco elevado, constituido por lomeríos con valles (INEGI, 2000a). Bacadéhuachi se localiza en la subprovincia Sierras y Cañadas del Norte, que presentan laderas escarpadas con valles intermontanos, conformados principalmente por rocas volcánicas ácidas, aunque también existen grandes

franja basáltica. Baviácora está comprendida en la subprovincia Sierras y Valles del Norte, formada por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur. La altitud de los sistemas montañosos excede generalmente los 1,000 m s.n.m., pero decrece hacia el sur donde gran parte de las elevaciones son menores (INEGI, 2000a).

Las características geológicas de Álamos y Bacadéhuachi indican que poseen rocas correspondientes a la Era Mesozoica del Periodo Cretácico, con una edad de 65 a 145 millones de años. Estos sitios se diferencian según el tipo de roca presente. En Bacadéhuachi predomina el granito (esencialmente cuarzo y feldespato, y plagioclasa en cantidades variables), mientras que granodiorita en Álamos (básicamente cuarzo y plagioclasa, y poca cantidad de feldespato alcalino). Las localidades de Baviácora pertenecen a la Era Cenozoica del Periodo Terciario, con rocas tipo riolita de origen volcánico, constituida por una mayor proporción de cuarzo y feldespato alcalino, y menor de plagioclasa sódica (INEGI, 2000a).

Los sitios de Álamos presentan un clima $BS_1(h)hw$, el cual es cálido con una temperatura media anual >22 °C y en el mes más frío <18 °C. El periodo de máxima precipitación ocurre en verano, mientras que en invierno fluctúa entre 5 y 10%. En las localidades de La Morita (Bacadéhuachi) y La Cieneguita (Baviácora) predominan condiciones $BS_1kw(x')$, caracterizadas por un ambiente templado con una temperatura promedio anual de $12-18$ °C y en el mes más frío entre -3 y 18 °C. El verano es cálido con >80 % de las precipitaciones entre mayo y octubre, mientras que las lluvias invernales representan >10 % (INEGI, 2000b). La unidad climática $BS_1hw(x')$ es la mejor representada en los predios La Montosa 1 y 2 (Baviácora), La Palmita y Los Cuates (Bacadéhuachi), con una temperatura semicálida media anual de $18-22$ °C y en el mes más frío con un promedio <18 °C. El régimen de precipitación es principalmente de verano, mientras que las lluvias invernales de ~ 10 % (INEGI, 2000a).

Las áreas muestreadas se ubican en la región hidrológica Sonora Sur, cuyas corrientes nacen en su mayoría en la Sierra Madre Occidental. Los sitios de Bacadéhuachi pertenecen a la subcuenca Río Bavispe-bajo en el Río Yaqui, mientras que los de Baviácora al Río Sonora-Banámichi y los de Álamos a la subcuenca Río Mayo-Presa Adolfo Ruiz Cortínez. El coeficiente de escurrimiento en todas las áreas, derivado de las precipitaciones varió de 10 a 20%, el cual es importante porque se generan las

corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras. Las localidades presentan mayormente material consolidado con posibilidades bajas de porosidad y permeabilidad (INEGI, 2017).

En relación con las características edafológicas, en Bacadéhuachi predominan los suelos tipo feozem y litosol, mientras que regosol en Baviácora y Álamos, aunque en este último existe una franja amplia de litosol. El feozem corresponde a suelos pardos que pueden presentarse en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas marcadamente desérticas. Poseen una capa superficial oscura, rica en materia orgánica y nutrientes con profundidad variable. El regosol se caracteriza por suelos semejantes al material parental, poco desarrollados y constituidos por material suelto. Pueden sustentar cualquier tipo de vegetación, dependiendo del clima y la textura varía de media a gruesa. El litosol se distingue por suelos delgados con <10 cm de profundidad, distribuidos en lomeríos y sierras. En la parte oriental de Sonora, predominan los terrenos con textura media y según el clima, soportan selvas bajas o matorrales altos (INEGI, 2007).

En la región Huasteca de México (sur de Tamaulipas, norte de Veracruz, oriente de San Luis Potosí y noreste de Hidalgo), el clima predominante es cálido-húmedo con precipitación anual de 600 a 1,200 mm. Los suelos donde se desarrollan los chiles silvestres y semidomesticados son principalmente arcillosos con topografía plana o ligeros lomeríos; en las faldas y áreas montañosas de la Sierra Madre Oriental, donde la mayoría de los suelos son pedregosos. La vegetación predominante a >150 m s.n.m. es la selva media y baja, mientras que en la costa: matorrales, palmeras, pastizales y selva baja (Ramírez-Meraz *et al.*, 2015).

El análisis físico y químico del suelo mostró un porcentaje de arcilla (8 - 14.3), limo (24 - 28.3) y arena (58.7-68), similar entre las áreas (mediana de Mood, $P > 0.05$), lo cual se reflejó en una textura francoarenosa para todos los sitios con excepción de dos localidades, Los Cuates, Bacadéhuachi (suelo franco) y Los Josos 1, Álamos (franco-limoso). El contenido promedio de materia orgánica fluctuó de 2.69 a 3.24 %, que corresponde a un nivel medio, mientras que el pH fue ligeramente ácido de 6.06 a 6.23 (cuadro 2). El porcentaje promedio de sodio intercambiable resultó <0.16 en todas las áreas, la relación de adsorción de sodio <0.71 (RAS), la conductividad eléctrica cambió de 0.77 (bosque bajo

abierto) a 1.06 dS m^{-1} (selva baja caducifolia con terreno de temporal), mientras que la concentración de sodio de $60 - 66 \text{ mg kg}^{-1}$. Estos valores indican que no existe problema alguno de salinidad.

CUADRO 2
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO DE POBLACIONES
SILVESTRES DE *CAPSICUM ANNUM* VAR. *GLABRIUSCULUM* EN SONORA

Factor	Álamos	Bacadéhuachi	Baviácora
pH	6.06 ^a	6.23 ^a	6.06 ^a
Materia orgánica (%)	2.69 ^a	3.24 ^a	2.78 ^a
Conductividad eléctrica (dS m^{-1})	1.06 ^a	0.77 ^a	0.92 ^a
Relación de adsorción de sodio	0.49 ^b	0.70 ^a	0.63 ^{ab}
Sodio (mg kg^{-1})	66.30 ^a	64.80 ^a	60.00 ^a
Nitratos (mg kg^{-1})	2.05 ^a	1.78 ^a	2.26 ^a
Fosfatos (mg kg^{-1})	0.12 ^a	0.30 ^a	0.12 ^a
Potasio (mg kg^{-1})	0.68 ^a	0.40 ^a	0.52 ^a
Calcio (mg kg^{-1})	1590.00 ^a	2205.00 ^a	3240.00 ^a
Magnesio (mg kg^{-1})	186.70 ^a	310.00 ^a	185.00 ^a
Manganeso (mg kg^{-1})	20.37 ^a	18.97 ^a	27.63 ^a
Azufre (mg kg^{-1})	30.50 ^{ab}	38.00 ^a	26.10 ^b
Zinc (mg kg^{-1})	4.83 ^a	4.67 ^a	1.62 ^a
Arcilla (%)	8.00 ^a	13.00 ^a	14.30 ^a
Limo (%)	24.00 ^a	28.30 ^a	27.30 ^a
Arena (%)	68.00 ^a	58.70 ^a	68.00 ^a

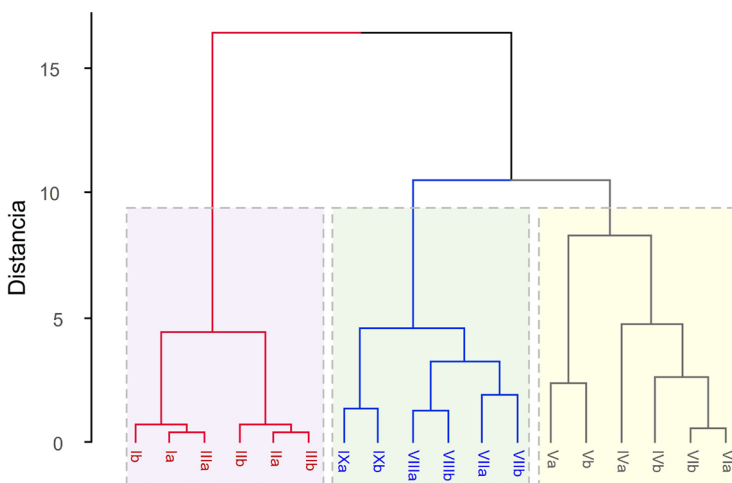
Literal distinta entre columnas indica diferencia significativa Kruskal-Wallis, mediana de Mood, $P < 0.05$.

Fuente:

El contenido de nitratos fue de 1.78 a 2.26, fosfatos de 0.12 a 0.3 y potasio de 0.4 a 0.68 mg kg^{-1} ; en general, los valores de estos tres macronutrientes son inferiores al nivel de referencia. Contrariamente, en los sitios estudiados varias sales registraron concentraciones superiores al valor de referencia como calcio (1,590 - 3,240 mg kg^{-1}), hierro (19 - 25 mg kg^{-1}) manganeso (18.9 - 27.6 mg kg^{-1}) y zinc (1.6 - 4.8 mg kg^{-1}), entre otros. El contenido en sales solubles de calcio, cloruros, sulfatos, magnesio y

sodio es comúnmente alto en zonas áridas. Los parámetros del suelo no variaron significativamente entre las poblaciones silvestres de chiltepín (mediana de Mood, $P > 0.05$), con excepción del contenido de azufre y la RAS; ambos por debajo del nivel de referencia. Aún con esta semejanza en los valores de los factores físicos y químicos, el análisis de conglomerados permitió asociar los sitios con características similares. En el dendrograma se muestra en forma de diagrama de árbol, las localidades agrupadas por municipio, sin traslape entre ellas (figura 1).

FIGURA 1



Dendrograma con base en los factores físicos y químicos del suelo de áreas naturales con *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*. Localidades de Álamos (I - III), Bacadéhuachi (IV - VI) y Baviácora (VII - IX), Sonora. a, b = subpoblación.
Fuente: Elaboración propia.

FACTORES BIÓTICOS

El tipo de vegetación de las poblaciones silvestres de *Cag* correspondió a pastizal natural e inducido, matorral subtropical, selva baja caducifolia mezclada con terrenos de temporal y bosque bajo abierto (cuadro 1). En las localidades de Bacadéhuachi se observaron disturbios derivados de una intensa actividad pecuaria, con un gran número de plantas

ramoneadas por ganado vacuno. En los tres sitios muestreados de este municipio, la vegetación está representada tanto por el estrato arbóreo como arbustivo. Las especies más importantes en la zona núcleo fueron *Prosopis velutina* (Valor de Importancia (VI) = 34 - 69), *Vachellia farnesiana* (VI = 39 - 85) y *Celtis pallida* (VI = 18 - 33). Al comparar la zona núcleo de la población de *Cag* vs. zona colindante, en esta última se registró una disminución significativa de mezquite. Debido a las dimensiones en altura y diámetro de *P. velutina*, es la especie con mayor cobertura y bajo su dosel se forma un microambiente donde la temperatura se reduce y la retención de agua se incrementa, favoreciéndose su función como nodriza, particularmente de *Cag*. En el cuadro 3 se presentan las especies asociadas con *Cag* en las áreas muestreadas.

CUADRO 3

PRINCIPALES ESPECIES VEGETALES ASOCIADAS CON *CAPSICUM ANNUM* VAR. *GLABRIUSCULUM* EN POBLACIONES SILVESTRES DE SONORA

Especie nodriza	Tipo de vegetación
<i>Ambrosia ambrosioides</i> (Delpino) W.W. Payne	MS, PN
<i>Celtis pallida</i> Torr.	BBA, PN
<i>Celtis reticulata</i> Torr.	MS, PI
<i>Coursetia glandulosa</i> A. Gray	PI
<i>Croton flavescens</i> Greenm.	MS
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	SBC+T
<i>Havardia mexicana</i> Britton & Rose	BBA, SBC+T
<i>Jatropha cordata</i> Müll.Arg.	MS, PI, PN
<i>Lysiloma</i> Benth. spp.	SBC+T
<i>Prosopis</i> L. spp.	SBC+T
<i>Prosopis velutina</i> Wooton	BBA, PI, PN
<i>Quercus</i> L. spp.	BBA
<i>Randia echinocarpa</i> Sessé & Moc. ex DC.	SBC+T
<i>Vachellia campeachiana</i> (Mill.) Seigler & Ebinger	MS, SBC+T
<i>Vachellia farnesiana</i> (L.) Wight & Arn.	BBA, PI, PN

BBA: Bosque bajo abierto; MS: Matorral subtropical; PI: Pastizal inducido; PN: Pastizal natural; SBC+T: Selva baja caducifolia mezclada con terrenos de temporal.

Fuente:

En Baviácora, la vegetación está constituida por herbáceas, en su mayoría gramíneas perennes. En la zona núcleo de La Cieneguita domina el estrato arbustivo principalmente *Croton flavescens* (VI=64), *Celtis reticulata* (VI=38) y *Jatropha cordata* (VI=27), mientras que en las localidades de La Montosa 1 y 2 existe mayor presencia de árboles, entre los que destacan *Havardia mexicana* (VI=60), *V. farnesiana* (VI=43), *Quercus chihuahuensis* (VI=32) y *P. velutina* (VI=12 - 84), y como arbusto *Opuntia robusta* (VI=7 - 37).

Las áreas de Álamos presentan vegetación abierta y dispersa, donde el arbolado forma manchones sobre todo cerca de cauces de arroyos. Las especies arbóreas y arbustivas de los predios Los Josos 1 y 2 predominantes en la zona núcleo fueron *H. mexicana* (VI=25 - 119), *Guazuma ulmifolia* (VI=38 - 65), *Prosopis* spp. (VI=69 - 74) y *Vachellia campeachiana* (VI=25 - 107). En el sitio Buenos Aires, la estructura está dada por árboles y arbustos como *Prosopis* spp. (VI=19 - 52), *Lysiloma divaricatum* (VI=30 - 75) y *Randia echinocarpa* (VI=29 - 35).

El valor de importancia de *Cag* en las zonas núcleo fluctuó de 15 (selva baja caducifolia) hasta 66 (pastizal natural), mientras que en las zonas colindantes desde 0 (matorral subtropical y selva baja caducifolia) hasta 19 (bosque bajo abierto). Después del pastizal natural en La Palmita, Bacadéhuachi, los VI más altos se registraron en bosque bajo abierto en las localidades Los Cuates, Bacadéhuachi (VI=60) y La Montosa 2, Baviácora (VI=47). La altura promedio de *Cag* en las nueve poblaciones varió de 1.21 a 1.77 m, mientras que el diámetro de 0.81 a 1.43 m; la fluctuación de ambas dimensiones fue significativa (mediana de Mood, $P < 0.05$) (cuadro 4). En un estudio de 19 poblaciones silvestres de *Cag* en Sonora (7), Sinaloa (11) y Nayarit (1), con una $N = 10$ individuos por población, la altura de la planta fue de 0.76 a 5 m, mientras que el largo de la rama principal de 0.42 a 3 m. El diámetro del tallo estuvo en un intervalo de 0.4 hasta 6.9 cm. Estas dimensiones cambiaron significativamente entre sitios (Tukey, $P < 0.05$) (Hernández-Verdugo *et al.*, 2012).

En un muestreo de 3 a 5 individuos de 98 poblaciones de *Cag* ubicadas en Tabasco y Chiapas, se analizaron 20 caracteres morfológicos de planta (13), flor (3) y fruto (4). Los especímenes promedio más altos fueron de 1.4 a 2.4 m, las hojas más largas de 4.4 a 6.2 cm y los frutos de mayor tamaño de 1.9 - 2.6 × 0.7 - 2.5 cm. Se observaron asociados con

CUADRO 4

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE *CAPSICUM ANNUUM* VAR. *GLABRIUSCULUM*
EN POBLACIONES SILVESTRES DE SONORA

Municipio	Altura de planta (m)	Diámetro de planta (m)	Densidad relativa	Cobertura (%)
Álamos	1.68 ^b	1.43 ^b	9.40 ^b	0.98 ^a
Bacadéhuachi	1.77 ^b	1.36 ^b	31.64 ^a	8.22 ^a
Baviácora	1.21 ^a	0.81 ^a	15.00 ^{ab}	2.40 ^a
Promedio Total*	1.50 ± 0.30	1.15 ± 0.33	17.29 ± 13.5	3.38 ± 4.33

*Media ± desviación estándar. Literal distinta en una misma columna indica diferencia significativa Kruskal-Wallis, mediana de Mood, $P < 0.05$.

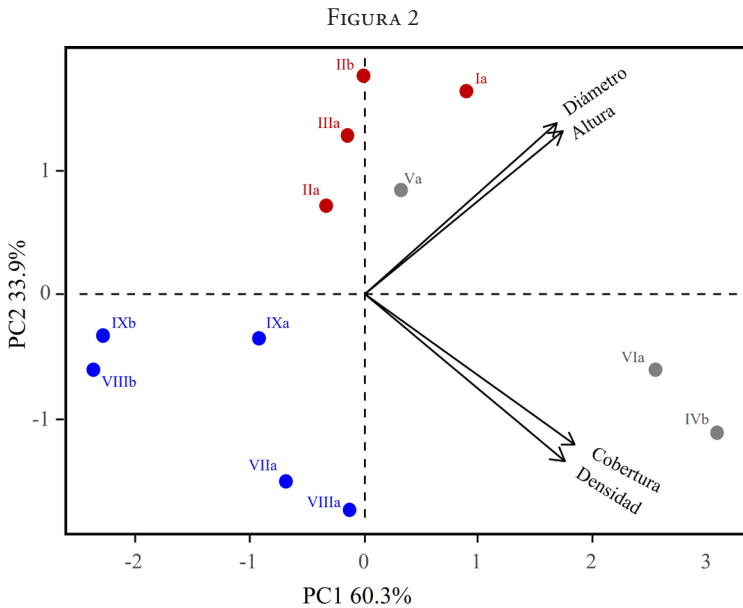
Fuente:

nueve tipos de hábitats, siendo más común (cobertura de 46–82%) en acahual, cacaotal, platanal, milpa, lienza de potrero, orilla de camino, y menos frecuente (cobertura de <30%) en solares, huerta de frutales y cítricos. No se encontró relación entre el tipo de ecosistema y los nueve morfotipos del fruto definidos por los productores con base en la variación de color, pigmentación, forma y tamaño. Las bayas más disímiles por alargadas y las dimensiones más altas se recolectaron en la Sierra Norte de Chiapas (Gutiérrez-Burón *et al.*, 2020).

ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

El ACP con los parámetros evaluados en las áreas naturales de Sonora, indica que con cuatro factores se explica el 70.4% de la variabilidad de los datos. El primer factor mostró las correlaciones más altas con los iones potasio (0.32) y magnesio (−0.28), mientras que en nutrientes con azufre (−0.27) y hierro (0.27). El segundo tuvo los mayores valores en la relación de adsorción de sólido (−0.35), altitud (−0.33) y nitratos (0.28). El tercero se correlacionó más con temperatura máxima promedio anual (0.42), árbol asociado (0.36) y tipo de vegetación (−0.36), y el cuarto con el porcentaje de materia orgánica (0.40), precipitación anual total (0.32) y tipo de suelo (0.31). El ACP de las variables morfológicas de las plantas indicó que los dos primeros componentes explican el 94% de la

varianza, 60.3 y 33.9% respectivamente. El primero corresponde a una suma ponderada de las variables altura (0.48), diámetro (0.48), densidad (0.49) y cobertura (0.5); el segundo, contrasta los valores de diámetro (0.51) y altura (0.50) contra cobertura (-0.51) y densidad (-0.45). Las muestras tienden a agruparse según su origen (figura 2).



Análisis de componentes principales de variables morfológicas de poblaciones silvestres de *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*. Localidades de Álamos (I - III), Bacadéhuachi (IV - VI) y Baviácora (VII - IX), Sonora. a,b=subpoblación.
Fuente: Elaboración propia.

El ACP de 98 poblaciones de *Cag* en Chiapas y Tabasco mostró que los tres primeros componentes explican el 50.2% de la variación. El primero contribuyó en un 22.8% de la variabilidad, asociado principalmente a forma de la hoja (0.41), relación largo/ancho foliar (0.37), margen de la hoja (-0.42) y altura de la planta/diámetro del tallo (-0.36). Las poblaciones se diferencian y agrupan de acuerdo con las características de las localidades (altitud, suelo, vegetación) (Gutiérrez-Burón *et al.*, 2020).

El análisis de la variabilidad morfológica de 11 poblaciones silvestre de *Cag*, ubicadas en la Sierra Gorda y semidesierto de Querétaro y

Guanajuato, con base en 44 caracteres de plántula, planta, floración, madurez de fruto y semilla, indicó que los tres primeros factores del ACP explican el 56.6 % de la variación. En el primer componente contribuyeron más el peso (0.32), ancho (0.3) y longitud del fruto (0.27); en el segundo, el ancho (0.32) y pubescencia foliar (0.31); en el tercero, la forma del fruto (0.34) y color de las anteras (-0.3). La diversidad morfológica observada sugiere respetar el manejo del germoplasma conforme a su origen y el desarrollo de programas de aprovechamiento sostenible de la flora a nivel regional (Ramírez *et al.*, 2018).

En un estudio de 29 poblaciones de chile silvestre y semi-silvestre de Chiapas y Tabasco (Gálvez *et al.*, 2018), en cuanto a la diversidad morfológica de hoja, tallo, fruto, altura de planta y diámetro del tallo, del primer ACP se seleccionaron las nueve variables más significativas y se hizo un segundo ACP, cuyos tres componentes principales explicaron el 58.2 % de la variación. En el primero (22.5 %), las contribuciones más importantes fueron diámetro del tallo (0.57) y número de semillas por fruto (0.47); en el segundo (20.7 %), color foliar (-0.54) y longitud del fruto (-0.45); en el tercero (15 %), margen del cáliz (0.6) y altura de la planta (0.57).

En estas evaluaciones morfológicas multivariadas de *Cag*, el ACP mostró que los tres primeros componentes explican generalmente alrededor del 55 % de la variación de los datos, lejos aún del 80 % establecido por Pla (1986) para una mejor explicación de la diversidad del germoplasma evaluado. Lo anterior podría deberse al entrecruzamiento intra- e interespecífico natural de las poblaciones silvestres, incluso se ha observado hibridación unilateral en especies de *Capsicum* (Pérez-Castañeda *et al.*, 2015).

Un estudio que cumple con este valor crítico se realizó por Hernández-Verdugo *et al.* (2012). El ACP de las variables climáticas y geográficas de 19 poblaciones silvestres de chiltepín en el noroeste de México, indicó que los primeros dos componentes explican un 85.2 % de la varianza. Las medias de las poblaciones para la longitud, diámetro, peso y número de semillas por fruto se correlacionaron positiva y significativamente con el segundo componente principal, siendo las más importantes la altitud (0.58), la temperatura (-0.58) y la precipitación media anual (0.52); mientras que para el primer componente (60.6 %) sobresalieron latitud (0.55) y longitud (0.56).

El clima se considera uno de los principales factores que influyen sobre la distribución y la variabilidad morfológica de las plantas porque afecta directamente los procesos fisiológicos del crecimiento, desarrollo y reproducción e indirectamente, por la competencia de recursos. Particularmente, la temperatura y la precipitación pueden perjudicar la producción de frutos y semillas (Solís, 2010). De forma similar, Hernández-Verdugo *et al.* (2012) encontraron que la variación morfológica de las poblaciones silvestres de *Cag* está relacionada con los factores climáticos del sitio de origen, particularmente la temperatura y la cantidad de agua disponible para las plantas.

Con estos resultados es posible que las poblaciones de chile silvestre del noroeste de México sean afectadas por el inminente cambio climático, el cual llevará a Sonora hacia una disminución del 21.3 % de precipitación y un aumento de temperatura de 3.57 °C. El calentamiento global antropógeno estimado se incrementa actualmente a 0.2 °C por decenio y es probable que llegue a 1.5 °C en las próximas décadas, con lo cual se prevé que el 8 % de las plantas pierdan >50% de su distribución geográfica (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012; IPCC, 2019).

TRASPLANTE EN ÁREAS NATURALES

Para la selección del sitio se deben tomar en cuenta los factores bióticos y abióticos, que juegan un papel decisivo en la distribución y desarrollo de las plantas. Uno de los primeros elementos a considerar después de la vegetación será la topografía, evitar terrenos con demasiada inclinación. Una textura franco-arenosa es favorable para el crecimiento del chiltepín, debido a su capacidad equilibrada de retener agua y permitir el drenaje necesario; así como suelos poco profundos por la morfología y longitud de su raíz, y un porcentaje medio a alto de materia orgánica. Evitar terrenos con problemas de salinidad y analizar el flujo de los vientos por las heladas.

No es necesario podar la nodriza, retirar sólo aquello que impida el trasplante, ya que la vegetación asociada disminuirá la disponibilidad de las plántulas como alimento para los animales. Si se realiza el trasplante en un agostadero, evitar sitios con mayor riesgo como senderos y echa-deros. Eliminar únicamente las herbáceas del hoyo donde se colocará la

planta; incluso en algunos terrenos esa labor de limpieza es innecesaria. Las cepas se realizarán acorde con los árboles y arbustos seleccionados en el análisis de vegetación. El dosel de la nodriza definirá el número de plantas a colocar. Por lo general en arbustos se trasplantan dos o tres, mientras que en árboles se analiza individualmente.

FIGURA 3



Trasplante de *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*. A. Realización de la cepa. B - D. Corte para retiro de bolsa. E - F. Colocación de planta y apisonamiento de tierra. G. Chiltepín trasplantado en área natural.

Fuente: Elaboración propia.

La exposición a la radiación solar debe considerarse, ya que generalmente los efectos son mayores en las plantas que reciben la luz de mediodía hacia la puesta del sol, por la acumulación de calor. Sin embargo, lo anterior debe evaluarse en cada sitio porque alguna elevación como una sierra, puede modificar ese patrón. El tamaño de las cepas será al menos el doble del cepellón para un mejor crecimiento de las raíces. Si es bolsa de un kilogramo, con el ancho y profundo de una pala normal será suficiente (figura 3A). Las cepas deben realizarse de preferencia antes del periodo de lluvias.

Para lograr un mayor porcentaje de prendimiento en el trasplante, es de vital importancia realizarlo después de la primera lluvia de consideración, la cual varía según la zona; comúnmente ocurre en el mes de julio o principios de agosto. Para retirar la bolsa que contiene la planta de chiltepín, se harán uno o dos cortes según su tamaño de preferencia sobre la cepa (figura 3B, C). Procurar que el cepellón no se rompa; si ocurre, que las raíces no duren mucho expuestas. Se cubrirá el hoyo con la misma tierra que se extrajo, apisonando ligeramente. La planta debe estar bien enterrada, de lo contrario con alguna lluvia o el paso de algún animal podría desenterrarse (figura 3D-G).

Cuando el trasplante se realiza de manera correcta, los cuidados son mínimos. Se recomienda visitar periódicamente el sitio para evitar pérdida de plantas por remoción con las lluvias o animales, así como vegetación que sofoque el desarrollo. Con un indicio de enfermedad es importante analizar el agente causal. Si el problema puede volverse grave es mejor retirar la planta infectada y evitar su propagación. Se recomienda como una primera opción de forestación, la selección de áreas donde existe/existió chiltepín silvestre. Utilizar semillas preferentemente de la zona donde se realizará el trasplante. Para un mejor desarrollo inicial escoger las plantas con una talla mínima entre 25 y 30 cm. Que el productor/recolector de chiltepín no dude en aplicar su experiencia para un mayor éxito en el trasplante. Se ha logrado una supervivencia de 55 a 85 % con este protocolo, dependiendo de las condiciones naturales del sitio.

CONSIDERACIONES A CORTO PLAZO

La biología de la conservación de los PSC se basa en comprender la dinámica de los procesos ambientales y ecológicos relacionados con las plantas, para desarrollar protocolos de aprovechamiento sostenible que permitan mantener la herencia genética a largo plazo (Warschefsky *et al.*, 2014). Las estrategias se centran en bancos de germoplasma, jardines botánicos, recuperación de poblaciones silvestres y cultivos de selección para mejoramiento, entre otros. En los bancos de genes están mal representados los PSC, sobre todo al considerar su distribución geográfica y la variabilidad ecológica del hábitat (Castañeda-Álvarez *et al.*, 2016). El número de jardines botánicos es limitado en Latinoamérica y más aún, los proyectos de recuperación de áreas naturales impactadas. Por la alta plasticidad morfológica, fisiológica y genética de *Cag*, su potencial para mejoramiento de cultivos es alta (Castañeda-Álvarez *et al.*, 2016). Sin embargo, el cambio climático hace mayor este reto debido a la presión que ejerce sobre los PSC e incrementará en las próximas décadas.

El conocimiento sobre la fenología, ecofisiología, relaciones ecológicas y mutualistas, ontogenia del fruto, variabilidad genética, germinación, viabilidad de semillas, entre otros, coadyuvará en el establecimiento de bases sólidas para contrarrestar el sobre-aprovechamiento de *Cag*, que ha llevado a un declive de las poblaciones silvestres, aumento de la erosión genética y surgimiento de enfermedades, particularmente virales en regiones con alta actividad antropogénica (Fielder *et al.*, 2015; Maxted *et al.*, 2013).

Los resultados de las pruebas de germinación son a menudo impredecibles, más aún si las semillas tienen diferente origen. Conocer las propiedades físicas, bioquímicas y genéticas de las semillas, así como su viabilidad, vigor, vida de almacén, entre otros, resulta crucial (Fu *et al.*, 2015). El porcentaje de germinación de semillas en *Cag* ha fluctuado de 0.69 a 86.6 con diferentes accesiones (González-Cortés *et al.*, 2015; Mireles-Rodríguez *et al.*, 2015), cuyo amplio rango se ha atribuido a la alta variabilidad genética de las poblaciones, inherente a las condiciones ambientales del lugar de origen (González-Jara *et al.*, 2011).

El desarrollo de protocolos específicos y eficientes con tecnologías innovadoras, incluyendo biomarcadores genéticos y bioquímicos, debe enfocarse en la evaluación de los procesos de maduración de frutos y

semillas (viabilidad, dormancia, longevidad; velocidad de imbibición, germinación y degradación de almidón). La capacitación de las comunidades rurales sobre el manejo de la semilla y el cultivo de *Cag* es un elemento clave porque estas personas representan el vínculo directo para la conservación de los recursos. Las instituciones locales tienen la responsabilidad de proporcionar las herramientas para asegurar un mantenimiento *in situ* a largo plazo de los PSC (Fielder *et al.*, 2015).

Resulta fundamental integrar los intereses de los productores a nivel local, la investigación y el desarrollo tecnológico del sector académico, y el apoyo financiero del gobierno (Zhang *et al.*, 2017). Esta alianza tripartita facilitaría el desarrollo de estrategias para un aprovechamiento sostenible en áreas naturales, que a su vez brindaría bases sólidas para esquemas con bancos de germoplasma y utilización de su diversidad genética (Castañeda-Álvarez *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017), así como afrontar los desafíos para lograr avances a favor de la conservación de *C. annuum* var. *glabriusculum*.

CONCLUSIONES

La variación morfológica de las poblaciones silvestres de *Cag* fue significativa, relacionada con los factores ambientales (bióticos y abióticos) de cada localidad. La diversidad observada sugiere un manejo del recurso según su origen y el desarrollo de protocolos de aprovechamiento sostenible por área. Debido al reto que representa, un modelo de cooperación tripartita entre productores, sector académico y gobierno parece promisorio.

REFERENCIAS

- BAÑUELOS, N., Salido, P. L., Gardea, A. (2008). “Etnobotánica del chiltepín. Pequeño gran señor en la cultura de los sonorenses”, *Estudios Sociales*, 16(32), 178–205.
- CASTAÑEDA-ÁLVAREZ, N.P., Houry, C.K., Achicanoy, H.A., Bernau, V., Dempewolf, H., Eastwood, R.J. *et al.* (2016). “Global conservation priorities for crop wild relatives”, *Nature Plants*, 2, 16022.

- FIELDER, H., Brotherton, P., Hosking, J., Hopkins, J.J., Ford-Lloyd, B., Maxted, N. (2015). "Enhancing the conservation of crop wild relatives in England", *PLoS ONE*, 10, e0130804.
- FU, Y. B., Ahmed, Z., Diederichsen, A. (2015). "Towards a better monitoring of seed ageing under *ex situ* seed conservation", *Conservation Physiology*, 3(1), cov026.
- GÁLVEZ, Y.A., Martínez, E., Ramírez, S., Latournerie, L., Leshner, J.M., Castañón, G. (2018). "Morphological diversity of wild and semi-wild chili populations of Tabasco and the north of Chiapas States, México", *Phyton - International Journal of Experimental Botany*, 87, 60–67.
- GUTIÉRREZ-BURÓN, R., Latournerie-Moren, L., Garruña-Hernández, R., Ruiz-Sánchez, E., Lara-Martín, A.L., Castañón-Nájera, G. (2020). "Diversidad fenotípica de chile amashito de Tabasco y Chiapas, México", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(3), 649–662.
- GONZÁLEZ-CORTÉS, N., Jiménez, R., Guerra, E.C., Silos, H., Payro de la Cruz, E. (2015). "Germinación del chile amashito (*Capsicum annum* L. var. *glabriusculum*) en el sureste mexicano", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11, 2211–2218.
- GONZÁLEZ-JARA, P., Moreno-Letelier, A., Fraile, A., Piñero, D., García-Arenal, F. (2011). "Impact of human management on the genetic variation of wild pepper, *Capsicum annum* var. *glabriusculum*", *PLoS ONE*, 6, e28715.
- HAYANO-KANASHIRO, C., Gámez-Meza, N., Medina-Juárez, L. A. 2016. Wild pepper *Capsicum annum* L. var. *glabriusculum*: Taxonomy, plant morphology, distribution, genetic diversity, genome sequencing and phytochemical compounds, *Crop Science*, 56, 1–11.
- HERNÁNDEZ-VERDUGO, S., Porras, F., Pacheco-Olvera, A., López-España, R.G., Villarreal-Romero, M., Parra-Terraza, S., Osuna, T. (2012). "Caracterización y variación ecogeográfica de poblaciones de chile (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*) silvestre del noroeste de México", *Polibotánica*, 33, 175–191.
- INEGI. (2000a). "Síntesis de Información Geográfica y Cartas temáticas digitales (SIGE de Sonora). 1:1000,000". Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

- INEGI. (2000b). “Diccionario de Datos Climáticos Escalas 1:250,000 y 1:1000,000 (Vectorial)”. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI. (2007). “Carta Edafológica H12–8, H12–9, G12–03. 1:250,000 (Digital). Serie I”. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#Descargas>
- INEGI. (2017). “Mapa Digital de México V6.1”. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6>
- IPCC. (2019). “Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Calentamiento global de 1.5 °C”. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- JIMÉNEZ-LEYVA, J.A., Gutiérrez, A., Orozco, J.A., Vargas, G., Esqueda, M., Gardea, A., *et al.* (2017). “Phenological and ecophysiological responses of *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* to native arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus availability”, *Environmental and Experimental Botany*, 138, 193–202.
- KRAFT, K.H., Brown, C.H., Nabhan, G.P., Luedeling, E., Luna, J.J., d’Eeckenbrugge, G.C., *et al.* (2013). “Multiple lines of evidence for the origin of domesticated chili pepper, *Capsicum annuum*, in Mexico”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 6165–6170.
- MARTÍNEZ-AUSTRIA, P.F., Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México, *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3, 5–20.
- MAXTED, N., Kell, S., Brehm, J.M. (2013). “Crop wild relatives and climate change”. In M. Jackson, Ford-Lloyd, B., Parry, M. (Ed.), *Plant Genetic Resources and Climate Change* (pp. 114–136). Wallingford: CABI.
- MIRELES-RODRÍGUEZ, E., Moctezuma-Balderas, N.L., Castro-Nava, S., Salazar-Hernández, R., Lucio-Castillo, H., Pérez-Jasso, C. (2015). “Preacondicionamiento en la germinación de cuatro colectas de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *aviculare*) de Tamaulipas, México”, *Acta Agrícola y Pecuaria*, 1(3), 99–106.

- MONTESINOS-NAVARRO, A., Verdú, M., Querejeta, J.I., Sortibrán, L., Valiente-Banuet, A. (2016). "Soil fungi promote nitrogen transfer among plants involved in long-lasting facilitative interactions", *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 18, 45–51.
- NOSS, C.F., Levey, D.J. (2014). "Does gut passage affect post-dispersal seed fate in a wild chili, *Capsicum annuum*?", *Southeastern Naturalist*, 4, 475–483.
- PÉREZ-CASTAÑEDA, L.M., Castañón-Nájera, G., Ramírez-Meráz, M., Mayek-Pérez, N. (2015). "Avances y perspectivas sobre el estudio del origen y la diversidad genética de *Capsicum* spp.", *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(4), 117–128.
- PICKERSGILL, B. (2016). "Chile peppers (*Capsicum* spp.)". In R. Lira, Casas, A., Blancas, J. (Ed.), *Ethnobotany of Mexico* (pp. 417–437). New York: Springer.
- PLA, E. (1986). *Análisis multivariado: Método de componentes principales*. Washington: Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos.
- QIN, C., Changshui, Y., Yaou, S., Xiaodong, F., Lang, C., Jiumeng, M. *et al.* (2014). "Whole-genome sequencing of cultivated and wild peppers provides insights into *Capsicum* domestication and specialization", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 5135–5140.
- RAMÍREZ, U.I., Cervantes, F., Montes, S., Raya, J. C., Cibrián A., Andrio, E. (2018). "Diversidad morfológica del chile piquín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) de Querétaro y Guanajuato, México". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6), 1159–1170.
- RAMÍREZ-MERÁZ, M., Villalón-Mendoza, H., Aguilar-Rincón, V.H., Corona-Torres, T., Latournerie-Moreno, L. (2015). "Caracterización morfológica de chiles silvestres y semidomesticados de la región Huasteca de México", *Agroproductividad*, 8, 9–16.
- ROBLES, J.M., Garza, M.C. (2015). "Restricciones de mercado y condicionantes a la organización en la comercialización de chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) en el mercado norteamericano". *Revista Mexicana de Agronegocios*, 19(36), 1230–1240.

- SOLÍS, V.G. (2010). “Geographic patterns of morphological variation in *Turnera sidoides* subsp. *pinnatifida* (Turneraceae)”. *Plant Systematics and Evolution*, 284, 231–253.
- WARSCHEFSKY, E., Penmetsa, R.V., Cook, D.R., von Wettberg, E.J.B. (2014). “Back to the wilds: Tapping evolutionary adaptations for resilient crops through systematic hybridization with crop wild relatives”. *American Journal of Botany*, 101, 1791–1800.
- ZHANG, H., Mittal, N., Leamy, L.J., Barazani, O., Song, B.H. (2017). “Back into the wild-apply untapped genetic diversity of wild relatives for crop improvement”, *Evolutionary Applications*, 10, 5–24.

CAPÍTULO 9
SECADO DEL CHILTEPÍN
TECNOLOGÍA PARA COMUNIDADES RURALES

LUZ DEL CARMEN MONTOYA-BALLESTEROS¹
ALBERTO GONZÁLEZ-LEÓN²

RESUMEN

El chiltepín es un chile muy picante de color rojo intenso. Es un recurso genético invaluable porque se le conoce como el ancestro genético del chile. Tiene un importante papel en la dinámica económica, cultural y gastronómica de México, en particular en el noroeste del país; se considera una especia sofisticada por su sabor, color y aroma distintivos de otros chiles consumidos en la región. Al respecto, sus índices de calidad se basan en el grado de picor y color, características proporcionadas por capsaicinoides y carotenoides respectivamente, los cuales tienen un importante papel bioactivo por su efecto en la prevención de enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas y oncológicas. El principal proceso para la conservación del chiltepín es el secado; sin embargo, la calidad y los compuestos bioactivos dependen del método de secado, ya que se deterioran a temperaturas superiores a 40°C y con tiempos largos de proceso o exposición directa a la luz solar. Por lo anterior, es primordial utilizar tecnologías de secado adecuadas. En este capítulo se describen

¹ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. (CIAD, A.C). Carretera a la Victoria Km 0.6, C.P. 83304, Hermosillo, Sonora, México. Autora de correspondencia: lmontoya@ciad.mx.

² Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. (CIAD, A.C). Carretera a la Victoria Km 0.6, C.P. 83304, Hermosillo, Sonora, México.

las características de calidad y compuestos bioactivos del chiltepín, así como el efecto de métodos de secado. Se describen, además, recomendaciones para elegir el método de secado adecuado, utilizando tecnologías económicas con potencial para emplearse en comunidades rurales.

PALABRAS CLAVE: chiltepín, comunidades, secado, secadores solares.

INTRODUCCIÓN

Capsicum annuum L. var. *glabriusculum* se distribuye en México, al sur de Estados Unidos y Centroamérica; sin embargo, se reporta de gran importancia para México, en donde se desarrolla ampliamente por toda la zona costera (Treto *et al.*, 2021; Vázquez *et al.*, 2020). Acorde a su extendida localización, su dinámica cultural y de utilización, han surgido varios nombres regionales que lo identifican, como en el caso de chiltepín, designación particular del noroeste de México.

En esta región es de gran importancia socioeconómica, sobre todo para las comunidades rurales en donde se genera un dinamismo comercial, principalmente en época de recolección y cosecha. Se estima una recolección por temporada de entre 46 y 77 ton (Robles y Garza, 2015); el kilogramo de chiltepín seco puede alcanzar hasta 1 500 pesos. Este mercado sólo se limita a la región, pero tiene el potencial para llegar a mercados más competitivos, en donde las exigencias de calidad son mayores, y obtener con ello divisas de mayor valor. Una ventaja comercial por su cercanía es el mercado estadounidense (Robles y Garza, 2015). Otro mercado competitivo es el asiático, e incluso el mexicano; se requiere cumplir con los requerimientos de las normas de calidad e inocuidad para ofrecer un producto competitivo.

El chiltepín se considera como una especia distintiva por su sabor, color y aroma particulares, características debidas a sus propiedades físico-químicas; su predilección se relaciona con estos atributos físico-químicos (Moreno *et al.*, 2019), la que incluso se mantiene por generaciones (Robles y Garza, 2015). El fruto, al madurar, presenta un color rojo brillante y se considera muy picante (70 000 y 160 000 unidades Scoville (SHU)) (Mares y Valiente, 2019). El picor lo proporcionan los capsaicinoides, como capsaicina y dihidrocapsaicina.

Por su parte, el color resulta por los carotenoides, en particular capsantina y capsorrubina, que se encuentran en mayor proporción (Palma *et al.*, 2020). Tanto capsaicina, dihidrocapsaicina, como capsantina y capsorrubina son metabolitos que tienen principios bioactivos, que, por medio de su consumo, otorgan beneficios a la salud. El chiltepín, como el resto de las especies de *Capsicum*, contiene otros compuestos bioactivos, como la vitamina C, compuestos fenólicos y flavonoides (Vázquez *et al.*, 2020).

Este fruto, en su estado fresco, posee un alto contenido de humedad (800-950 g kg⁻¹ de peso seco (ps) (Montoya, 2015), lo que lo hace altamente perecedero. Por lo anterior, para su conservación en las comunidades rurales, se utiliza principalmente el proceso de secado al sol a cielo abierto, al igual que en la mayoría de los chiles. El chiltepín seco se utiliza como condimento en una variedad de productos alimenticios (Bañuelos *et al.*, 2008).

Los reportes sobre el efecto en la calidad y compuestos bioactivos del chiltepín, cuando se seca al sol a cielo abierto, son escasos; sin embargo, los que existen demuestran pérdida de ácido ascórbico y deterioro del color (Montoya *et al.*, 2017). Estudios con otros chiles concluyen sobre la sensibilidad de los compuestos bioactivos a temperaturas superiores a 40°C y a la exposición directa a la luz solar (Arslan y Özcan, 2011; Pochont *et al.*, 2020; Vega *et al.*, 2009); de ahí la importancia de valorar el método de secado, considerando las condiciones de temperatura y tiempo apropiado para el tipo de chile.

Las características de calidad y contenido de compuestos bioactivos en los productos procesados dependen de la calidad de la materia prima, el proceso de elaboración y la tecnología empleada. Adicionalmente, se requiere cumplir con la normatividad establecida para la producción de alimentos, y en particular para este tipo de productos secos. Considerar todo este conjunto de prácticas durante el procesamiento de alimentos ofrece la ventaja de poder comercializar un producto más competitivo de manera accesible en mercados más complejos.

Este capítulo proporciona información sobre las características de calidad y compuestos bioactivos del fruto de chiltepín, así como la información básica del proceso de secado en el nivel micro o de pequeña empresa. Se considera micro o pequeña empresa de procesamiento en comunidades rurales a aquella con máximo diez trabajadores, cuya operación es completamente manual o semimecanizada, normalmente utilizando no más de tres equipos motorizados monofásicos simples.

CHILTEPÍN QUE SE CONSUME EN EL NOROESTE DE MÉXICO

El chiltepín que se consume en Sonora es una especie silvestre y también una de las variedades de chile en proceso de domesticación, forma parte

del complejo *Capsicum annuum* L. (Herrera *et al.*, 2018). El que se encuentra en proceso de domesticación se cultiva en parcelas e invernaderos, se cosecha y se seca al sol a cielo abierto de igual forma que el recolectado en el campo. Al igual que el maíz y el frijol, los chiles domesticados (*C. annuum* var. *annuum* L.) en Mesoamérica, surgieron en múltiples eventos a través de diversas poblaciones naturales, por lo que existe una interrelación y flujo genético entre los chiles domesticados, los semidomesticados y los silvestres (Aguilar *et al.*, 2009, Goettsch *et al.*, 2021).

Calidad del chiltepín rojo

Como en todos los chiles rojos, el grado de picor y el color son considerados los dos factores de calidad más importantes (Getahun *et al.*, 2021). El picor se debe a los capsaicinoides, de los cuales la capsaicina y la dihidrocapsaicina contribuyen del 80 al 90% respectivamente. Mientras que el color lo imparten los carotenoides, como capsorrubina y capsantina; esta última contribuye del 30 al 60% del total de los carotenoides en frutos maduros (Palma *et al.*, 2020). El chiltepín es conocido como extremadamente picante con un rango en unidades Scoville entre 70 000 y 160 000 (Mares *et al.*, 2019), el cual es menor al del chile habanero (100 000 – 445 000 SHU) que es el más picante, el chiltepín estaría en segundo término, después del chile habanero (*Guía de horticultura de Iowa State University*, 2002).

En referencia al color, el chiltepín presenta un color rojo intenso. Estudios previos reportan para el color aparente en rangos de Cromo (C^*) = 38-45, y ángulo de matiz (h°) = 36-38° (Montoya *et al.*, 2017). Asimismo, Vera *et al.* (2011) reportaron que el color para el chile piquín (otra denominación regional) mostró valores de coordenadas cromáticas superiores ($C^* = 54.4$, $h^\circ = 45$). En los dos casos, estos valores se ubican en la región del rojo, en el diagrama de cromaticidad. El chiltepín es considerado como fruto pequeño, ya que su diámetro promedio es de 6.30 ± 0.83 mm (Vázquez *et al.*, 2020).

Compuestos bioactivos del chiltepín

Los compuestos bioactivos son productos del metabolismo secundario en los frutos; difieren según el fruto, la parte del fruto, la variedad, el estado de madurez, las condiciones de cultivo y de almacenamiento, así como las prácticas de procesamiento (Baenas *et al.*, 2019). En los chiles, los principales compuestos bioactivos son los carotenoides, capsaicinoides, compuestos fenólicos y vitamina C (Vázquez *et al.*, 2020).

Carotenoides. Estos compuestos bioactivos son los responsables de los diferentes colores que muestran los chiles, agregan un alto valor comercial a los frutos en términos de color y propiedades antioxidantes. Capsantina y capsorrubina son los responsables del color rojo; principalmente capsantina, que se encuentra en mayor proporción (40% al 60%) en las diferentes variedades de chiles (Wu *et al.*, 2020). La capsantina es considerada como un fitoquímico funcional debido a la propiedad que tiene de captar radicales libres de oxígeno y evitar el cáncer de colon (Patel, 2019). Otros estudios reportan actividad antitumoral (Wu *et al.*, 2021); además, puede prevenir o reducir la acumulación de lípidos en sangre y reducir el aumento de peso (Wu *et al.*, 2020).

La concentración de capsantina reportada en chiltepín fresco maduro varía entre 32.11 ± 0.03 y $57.05 \pm 0.23 \mu\text{g g}^{-1}$ en peso seco (Montoya *et al.*, 2017). Esta concentración es similar a la de otras variedades de chiles rojos, como el cultivar sole (*Capsicum annuum*) ($54.61 \mu\text{g g}^{-1}$), cultivar idealino (*Capsicum annuum*) ($49.7 \mu\text{g g}^{-1}$) y *Capsicum frutescens* ($55.0 \mu\text{g g}^{-1}$) (Arimboor *et al.*, 2015).

Capsaicinoides. El picor y parte de la actividad biológica con efectos benéficos para la salud de la mayoría de los chiles se debe a los capsaicinoides. Estos compuestos bioactivos son un grupo conformado por capsaicina (C), dihidrocapsaicina (DHC), nordihidrocapsaicina, homocapsaicina y homodihidrocapsaicina; difieren entre sí por la longitud de sus cadenas alifáticas (Choi *et al.*, 2006).

La capsaicina ((E)-N-(4-hidroxi-3-metoxibencil)-8-metil-6-noneamida) y la dihidrocapsaicina (N-((4-hidroxi-3-metoxifenil) metil-8-metilnonanamida) aportan entre 80 y 90% del total del picor (Martínez *et*

al., 2006). Los capsaicinoides pueden ubicarse en diferentes partes del fruto, tales como el pericarpio y las semillas; sin embargo, está documentado que la biosíntesis ocurre en la placenta (Tanaka *et al.*, 2021).

En estudios de chiltepín cultivado en invernadero, se reporta la máxima concentración de capsaicina a los cuarenta días de floración, la que corresponde a $53\,710\ \mu\text{g g}^{-1}$ (peso seco: ps). Esta concentración es mayor a la del chile de árbol cultivado también en invernadero y menor a la concentración para el chile habanero ($195,380\ \mu\text{g g}^{-1}$ (ps)) a los cincuenta días de floración (Contreras y Yahia, 1998).

En otros estudios de chiltepín de dos regiones de Sonora, cultivado también en invernadero, muestran concentraciones más altas de capsaicina en su estado maduro en comparación con el inmaduro, así como también diferencias en concentración entre regiones (Vázquez *et al.*, 2020). En la variación de las concentraciones de los capsaicinoides, se describen diferentes patrones de actividad de peroxidasas durante el catabolismo de capsaicinoides según el cultivar y el estado de madurez (Contreras y Yahia, 1998; Fayos *et al.*, 2019). Por otro lado, la amplia variabilidad observada en el contenido de capsaicinoides podría deberse a las condiciones de crecimiento y variabilidad genética entre cultivares (Fayos *et al.*, 2019).

En referencia al chiltepín bajo condiciones silvestres, no se han encontrado a la fecha reportes que den seguimiento a la síntesis de capsaicinoides durante su desarrollo; sólo se tienen datos de las concentraciones en chiltepín rojo maduro. Moreno *et al.* (2019) observaron una amplia variación en el contenido de capsaicina en las poblaciones naturales de *C. annuum* var. *glabriusculum*, cuando se analizaron los frutos recolectados de diferentes procedencias geográficas.

En estudios para el noroeste de México, se analizó el contenido de capsaicina procedente de distintas regiones, identificándose concentraciones distintas de este metabolito. En la región de Mazatán, Sonora, se colectaron frutos en varias épocas de producción y se reportaron valores entre $3\,010$ y $5\,540\ \mu\text{g g}^{-1}$ (ps) (Montoya *et al.*, 2017). Asimismo, en otras regiones del noroeste de México, como Álamos y Mazocahui, Sonora, se reportaron variaciones de entre $4\,200$ y $8\,200\ \mu\text{g g}^{-1}$ (ps) (Montoya *et al.*, 2010; Rochin *et al.*, 2013).

La concentración de capsaicina encontrada en el chiltepín de las diferentes regiones de Sonora es semejante a la del chile habanero rojo tipo

I (4 900 $\mu\text{g g}^{-1}$ (ps)), pero menor al habanero golden (8 170 $\mu\text{g g}^{-1}$ (ps)). Sin embargo, es mayor a la de los chiles jalapeño (1 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ (ps)), tabasco (900 $\mu\text{g g}^{-1}$ (ps)) y serrano (700 $\mu\text{g g}^{-1}$) (Giuffrida *et al.*, 2013; Topuz *et al.*, 2011). Respecto a la concentración de dihidrocapsaicina, ésta es menor que el contenido de capsaicina, lo cual es común en el género *Capsicum* (Montoya *et al.*, 2017).

Un aumento en la concentración de capsaicinoides se asocia también con el estrés por calor de acuerdo con la región en que se desarrolla la planta. Lo anterior puede provocar respuestas particulares de cada tipo de chile y cultivo; por esta razón, existe una amplia variabilidad en la capsaicina tanto entre los ecotipos como dentro de ellos (González *et al.*, 2013; Moreno *et al.*, 2019).

Recolección y manejo del chiltepín

Es importante considerar que todos los alimentos se pueden contaminar desde la cosecha hasta las etapas finales de empaque y comercio. Por lo anterior, se requiere observar y aplicar las buenas prácticas de manufactura. En particular, el chiltepín puede contaminarse por la forma en que se recolecta, transporta, durante el manejo de secado y en el almacenamiento.

Para evitar la contaminación en el chiltepín, se sugiere que cada recolector lleve consigo recipientes de plástico en donde recolectar el chiltepín, así como tijeras para cortarlo de la planta sin lastimarla. Asimismo, los recipientes o contenedores utilizados para el manejo del chiltepín deberán estar totalmente limpios, al igual que las manos del recolector, o en su caso utilizar guantes; evitar polvo, tierra u otra contaminación por insectos o heces de pájaros. Durante el manejo, se requiere no maltratarlos para evitar magulladuras o golpes, los cuales podrían ser fuente de contaminación interna. Se recomienda transportarse en recipientes limpios, evitando el polvo y contaminación cercana.

El proceso de secado

El secado de los frutos se realiza en las comunidades rurales que los producen; es una forma de conservación de los frutos que permite reducir

las pérdidas y con ello da oportunidad al productor/recolector de poder comercialarlo, o bien, almacenarlo. Con el secado de los frutos se evitan pérdidas en los activos económicos propios de la actividad. El proceso de secado incide además de forma favorable en la diversificación de la producción agrícola rural, apoyando a la economía e incrementando los vínculos comerciales con las zonas urbanas. Las consideraciones económicas, al igual que los desarrollos tecnológicos, son importantes en la toma de decisiones para la producción masiva de alimentos en las comunidades rurales. También son importantes los aspectos ambientales y sociales, especialmente con el creciente interés en el aprovechamiento sustentable y el uso de sistemas de bajo impacto al ambiente (Zhang *et al.*, 2016).

El proceso de secado de alimentos en general es la técnica para eliminar la humedad de los productos agrícolas o alimenticios, con la utilización adecuada de temperatura y tiempo. Swami (2018) demostró que para incrementar la vida de anaquel de un producto que contiene alta cantidad de agua se debe reducir esta humedad hasta 5%. Para lograr la reducción de agua, el proceso de secado emplea mucha energía, lo que puede ser costoso especialmente en las comunidades rurales; por ello, es importante buscar fuentes alternas a la energía que se obtiene a partir de fuentes fósiles o eléctrica. En este sentido, el secado solar tiene un gran potencial para procesar productos agrícolas en comunidades rurales, e incluso puede ser más económico que las fuentes de energía a partir de otros medios y se puede lograr obtener un producto de calidad.

El chiltepín, por su alto contenido de humedad, es susceptible a enfermedades fúngicas y presenta problemas poscosecha. Lo anterior reduce la vida de anaquel e incrementa las pérdidas económicas a los recolectores. El secado al sol y en secadores de convección forzada con aire caliente son dos de los métodos tradicionales más utilizados para el secado de los chiles en general. El secado solar a cielo abierto es el más económico; sin embargo, requiere un gran espacio y un tiempo de secado prolongado (Rabha y Muthukumar, 2017).

Aunado a lo anterior, los productos finales del secado solar a cielo abierto son considerados de mala calidad debido a la contaminación por agentes externos (presencia de insectos, plumas de aves, polvos, entre otros), lo cual repercute negativamente en el precio del producto final (Pochont *et al.*, 2020). La baja calidad del producto reduce las ganancias económicas estimadas, las ventas sólo se limitan en el ámbito regional,

sin la posibilidad de poder incursionar en mercados más complejos, en donde las exigencias de calidad son mayores (Robles y Garza, 2015). La magnitud de estas pérdidas en chile chiltepín no ha sido evaluada; no obstante, se tiene como referente que en chiles rojos la pérdida de calidad se estima entre 40 y 60% (Mangaraj *et al.*, 2001; Pochont *et al.*, 2020).

En la actualidad, el secado tradicional del chiltepín en la región noroeste de México se realiza al sol a cielo abierto; los frutos se exponen directamente durante el día, y por la noche se colocan dentro de las habitaciones de las casas; al siguiente día, se vuelven a exponer al sol. Lo anterior implica largos tiempos de exposición hasta alcanzar la humedad deseada en el producto. Dependiendo de las condiciones ambientales y la región donde se recolecte, el tiempo de secado es de cinco a siete días. Otra de las formas de secarlo es a la sombra en habitaciones ventiladas de manera natural.

Uno de los parámetros de calidad que son más afectados en el chiltepín durante el secado a cielo abierto es el color. Este factor es crítico, ya que es considerado el primer atributo de calidad que el cliente observa para decidir su compra. Cuando se seca a cielo abierto a temperatura ambiental de entre 34 y 40°C durante 32 h de exposición directa al sol, el color rojo característico se afecta hasta en un 36.7%.

El cambio de color es muy notable al compararse la materia prima con el producto procesado (Montoya, 2015; Rochin *et al.*, 2013). Existe una diferencia notable en el cambio de color (ΔE) que experimentó el producto final respecto a la materia prima; el chiltepín secado con el método tradicional mostró cambios con respecto al recién cosechado, con tonalidades de rojo menos saturado o intenso, como se muestra en la figura 1. Lo anterior puede deberse muy probablemente a la exposición a la luz solar, lo cual puede provocar una fotooxidación de los carotenoides responsables del color rojo, es decir, capsantina y capsorubina, y una decoloración después del secado al sol (Jiménez *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2006).

Por otra parte, cuando el chiltepín se seca bajo condiciones fuera de la luz directa del sol, por un tiempo de 72 h, en un rango de temperaturas de entre 28 y 35°C, el cambio de color ΔE^* es menor (2.5) (datos no publicados). En el secado de otros tipos de chiles, también se concluye que el secado al sol es perjudicial para los parámetros de color debido a la oxidación y descomposición de pigmentos (Kim *et al.*, 2002; Pochont

et al., 2020). El efecto en la pérdida de color se refleja además en los pigmentos que lo proporcionan, como es capsantina, considerada como compuesto bioactivo.

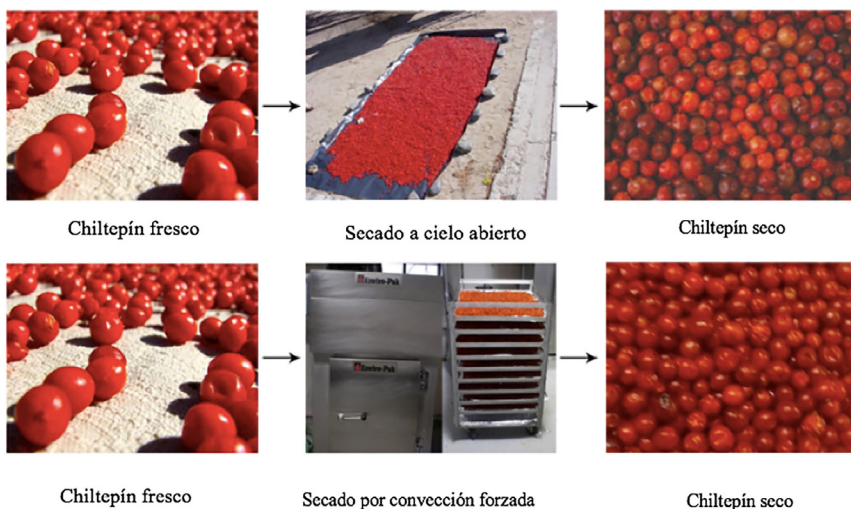
El secado al sol a cielo abierto, además, tiene un efecto negativo en el contenido de ácido ascórbico en chiltepín. Montoya *et al.* (2017) reportaron pérdidas del 90% en el contenido de ácido ascórbico en chiltepín, que ocurrieron durante las dos primeras horas de secado a cielo abierto. Para chiles rojos, cuando se secan al sol a cielo abierto, tienden a perder sus grupos funcionales que son responsables del color, el picante o algunas vitaminas. Algunos de los grupos fotofuncionales presentes en el chile son los compuestos fenólicos, carotenoides y vitaminas, los que son termosensibles y susceptibles de degradarse durante el proceso de secado (Pochont *et al.*, 2020).

Por otra parte, durante el secado por convección forzada en equipos en donde el aire se calienta a través de resistencias eléctricas, a temperaturas de entre 35 y 45°C, la capsantina se conserva hasta en un 25% más en comparación con el secado al sol a cielo abierto y las pérdidas por color son menores (Montoya *et al.*, 2017). A pesar de que la calidad y compuestos bioactivos en el chiltepín son mejores utilizando esta tecnología, el costo de producción se eleva por el uso de energía eléctrica, lo cual no sería factible económicamente para comunidades rurales o para productores de escasos recursos.

Teniendo en cuenta los inconvenientes de la pérdida de calidad en chiltepín cuando se seca al sol a cielo abierto y, por otro lado, el inconveniente de utilizar secadores comerciales que se desarrollan a una escala industrial, debido a su alto costo e inversión, una alternativa para los pequeños productores puede ser el uso de tecnologías utilizando la energía solar en cámaras de secado.

Con la técnica del secador solar en cámara de secado, pueden controlarse las variables del proceso y se evitaría la contaminación por insectos, polvo, etc.; aunado a ello, sería de bajo costo, por lo que puede ser adecuada para secar chiltepín, así como otros chiles en las comunidades rurales. En otros productos, se utiliza para conservar la calidad durante el secado; reduce además el riesgo del desarrollo de microorganismos, la infección por insectos y la contaminación por materias extrañas y toxinas. Existen varios diseños de secadores, que a continuación se presentan.

FIGURA 1



Secado solar y en secador por convección forzada.

Fuente: Montoya-Ballesteros *et al.* (2017).

TIPOS DE SECADORES SOLARES

El proceso en secadores solares se puede resumir como un mecanismo de absorción simple donde la radiación solar es absorbida de manera indirecta al alimento; así pues, la radiación solar no incide directamente sobre el producto que se ha de secar.

Los secadores solares podrían ser una alternativa para el método de secado al sol abierto, especialmente en los lugares con buen sol durante la temporada de cosecha de los productos (Akpınar y Bicer, 2008). Debido a esto, en los últimos años se ha incrementado el interés por utilizar los secadores solares. Según investigaciones, estos sistemas de secado solar se pueden clasificar de acuerdo con tres formas:

1) *Secadores directos*. Son los de tipo invernadero. Un invernadero es una estructura cerrada, cubierta por materiales transparentes, dentro de la cual es posible generar condiciones artificiales de microclima; permite el secado de los productos agrícolas y pueden convertirse en una buena

alternativa (Kooli *et al.*, 2007). Los secadores tipo invernadero pueden construirse de polietileno o polipropileno; esto, con fines de protección, siempre y cuando el alimento no entre en contacto directo con el plástico.

Para la construcción, se emplean estructuras de fierro; en algunas son tipo parabólicas (figura 2). Dentro del invernadero, se colocan tarimas; sobre ellas se puede colocar el chiltepín en charolas perforadas para facilitar el secado; durante el tiempo que el chiltepín permanezca en el secador, es importante moverlo continuamente, utilizando aditamentos de plástico o acero inoxidable. El funcionamiento de estos secadores solares se basa en el principio del invernadero; la radiación solar, al atravesar un material traslúcido, calienta los elementos que se encuentran dentro; éstos, a su vez, emiten radiación infrarroja con una longitud de onda mayor que la del sol, por lo cual no pueden atravesar la cubierta a su regreso, con lo cual quedan dentro y generan un calentamiento. La energía solar es atrapada dentro; tienen la propiedad de restringir la radiación ultravioleta (8% de la irradiación solar). Es conocido que esta radiación ultravioleta puede afectar las propiedades organolépticas como textura, color y sabor (Sangamithra *et al.*, 2014). Esto presenta una ventaja sobre el secado al sol abierto, donde la luz de onda corta incide directamente sobre los alimentos.

Los invernaderos pueden ser sencillos o de convección natural; el aire fluye a través de la ventilación natural del invernadero, por lo que puede tener ventanas. En este tipo de secadores, sólo se tiene el invernadero, sin ningún aditamento, como colector solar o dispositivos para remover la humedad y el aire interior del invernadero. En investigaciones

FIGURA 2



Secadores tipo invernadero.

Fuente: Jitjack *et al.* (2016); Kaewkiew *et al.* (2012).

se reporta que los cultivos secados en el tipo invernadero son de mejor calidad, pues se conserva mejor el color en comparación con los secados a cielo abierto (Prakash y Kumar, 2014; Sahdev *et al.*, 2016).

2) *Secadores solares indirectos*. En este tipo de secadores, el proceso se puede resumir como una absorción simple donde la radiación solar es absorbida por una superficie colectora (colector) y luego se convierte en calor. El calor absorbido por el colector se transfiere al fluido de transporte (generalmente aire, agua o aceite), con el cual se calienta el lugar o cámara de secado, el sistema por consiguiente es de convección forzada.

Según la zona en donde se utilice un secador solar, éste es capaz de elevar la temperatura de secado en la cabina en un promedio de 48 a 54°C. Los diseños propuestos para secadores indirectos cuentan con tres partes: Un colector solar, un soplador de aire y una cabina en donde se coloca el producto que se va a secar, de tal forma que la energía luminosa no es captada directamente por el alimento. Los colectores solares son los principales dispositivos del secado indirecto, ya que de ellos depende la eficiencia de los sistemas de secado.

Existen varios diseños de este tipo de secadores; en la figura 3 se muestran algunos, que pueden ser de convección natural o forzada. Los materiales de construcción pueden ser los siguientes: la cabina, con material de madera, dentro de ella estarán entrepaños en donde puedan colocarse charolas. Las charolas pueden ser de acero inoxidable y perforadas para que fluya el aire con facilidad; en estas charolas se coloca el producto que se secará. La parte que contiene al colector puede construirse de acero al carbón. El colector puede ser una lámina pintada de color negro; en la superficie se coloca una cubierta de vidrio, o bien de acrílico.

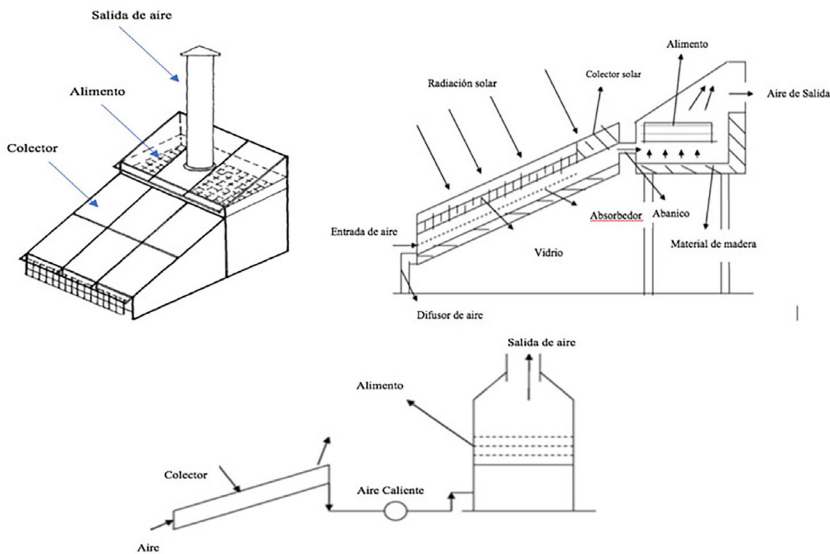
Goyal y Tiwari (1999) utilizaron el concepto de colector de placa plana como medio de calentamiento del aire, el que se envía a una cabina para secar productos agrícolas de manera eficiente. La eficiencia de un sistema de secado habitualmente se expresa por medio de diferentes parámetros, tales como eficiencia del secador, eficiencia del colector solar, tasa de extracción de humedad específica, capacidad evaporativa, entre otros (Quintanar y Roa, 2017). En el secado de productos agrícolas, la temperatura adecuada depende del colector solar cuando se utiliza placa plana (Fudholi y Sopian, 2019). Estudios en chiltepín utilizando este

tipo de secador de gabinete reducen el tiempo de secado de veinticuatro a nueve horas (datos no publicados).

3) *Secadores mixtos*. En este caso, el diseño se trata de la combinación de tecnologías; pueden ser los secadores tipo invernadero (directos) equipados con diferentes tipos de colectores solares, los que además son adaptados para convección forzada y controladores de humedad relativa. La convección forzada tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido (aire) sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser un ventilador, una bomba, el viento, etc.; la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural; se transfiere, por tanto, una mayor cantidad de calor hacia el invernadero o cabina de secado.

El secador solar mixto presenta varias ventajas; en primer lugar, el control del proceso es más simple (sobre todo en el caso de secadores de convección forzada, es decir con circulación forzada de aire). Es fácil de integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema

FIGURA 3



Diferentes diseños de secadores solares indirectos.

Fuente: Murthy (2009).

híbrido; el tener una cámara de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga. En otro tipo, el colector puede ser fotovoltaico; el sensor es una celda fotovoltaica de silicio; se encarga de transformar la radiación incidente en una señal eléctrica. Los sistemas fototérmicos convierten la radiación solar en calor y lo transfieren a un fluido de trabajo; en este caso, puede ser el aire; éstos dan respuesta inmediata y son económicos.

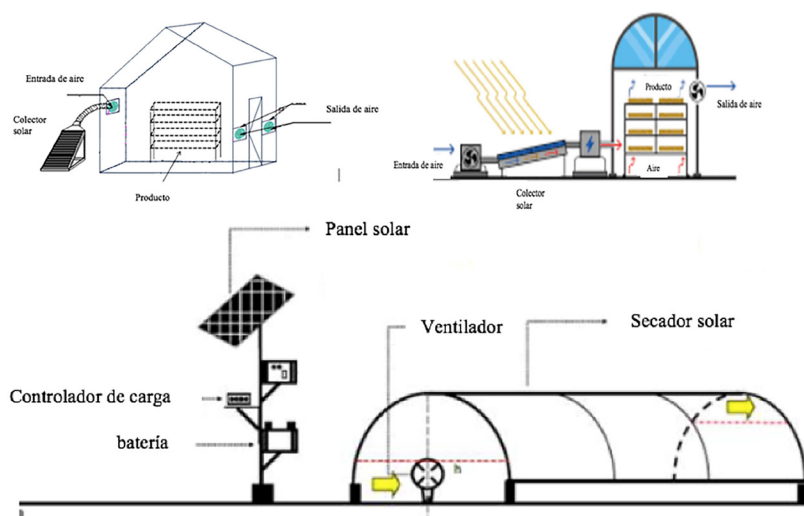
El sistema mixto es más efectivo que el sistema de secado solar abierto; en chiles, reduce el tiempo de secado con eficiencia máxima del colector hasta del 80% (El Khadraoui *et al.*, 2017; Umaru, 2018). En un secador de policarbonato tipo invernadero y equipado con soplador y extractor de aire, el secado es más eficiente en comparación con el secado a cielo abierto. Para el caso de secado de chiles utilizando esta tecnología, se logró una reducción considerable en el tiempo de secado. Las propiedades organolépticas, como textura, color y sabor de los chiles rojos (presencia de grupos funcionales analizados utilizando espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)) fueron retenidas por secado en invernadero (Pochont *et al.*, 2020).

En la figura 4 se muestra un secador tipo invernadero con mayor tecnificación. Como en todos los casos de secadores, es importante considerar el tipo y la forma del producto que se va a secar, la temperatura del invernadero, así como su control dentro de él. Estos secadores solares utilizados en la agricultura para el secado de alimentos son un dispositivo muy útil desde el punto de vista de la conservación de energía. No sólo ahorran energía, sino también tiempo y ocupan menos área.

Por otro lado, se obtiene mejor calidad del producto en comparación con el secado de sol abierto; es un proceso más eficiente y también protege al ambiente. El secado solar se puede utilizar para todo el proceso de secado o para complementar los sistemas de secado artificial, y reducir así la cantidad total de energía de combustible requerida. La selección del tipo de secador será de acuerdo con el volumen del producto y los recursos económicos disponibles.

Los secadores tipo gabinete (figura 3) pueden aplicarse para secar volúmenes pequeños por lotes, y son económicos. Por su parte, los secadores tipo invernadero, dependiendo de su tamaño, pueden secar grandes volúmenes por lotes y resultan con mayor eficiencia en la reducción

FIGURA 4



Tipos de secadores solares mixtos.

Fuente: El Khadraoui *et al.* (2019); Prada *et al.* (2019).

del tiempo de secado. En el cuadro 1 se especifica la funcionalidad y capacidad de acuerdo con el tipo de secador.

TENDENCIAS FUTURAS

En el secado del chiltepín a cielo abierto, la calidad se deteriora como se mencionó antes. Por otra parte, en secadores por convección forzada empleando resistencias eléctricas para calentar el aire de secado, son mejores la calidad y los compuestos bioactivos obtenidos; las temperaturas requeridas para ello son de entre 35 y 45° C.

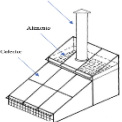

En la figura 1 se observa el color del chiltepín después del secado solar y por convección forzada. El cambio de color del chiltepín en el secado por convección forzada fue menor ($\Delta E^* = 10$) en comparación con el secado solar ($\Delta E^* = 17$), con la consecuente pérdida de compuestos bioactivos (Montoya, 2015; Montoya *et al.*, 2017). Estas temperaturas de secado son bajas en este tipo de proceso, por lo que son factibles de

alcanzar en secadores solares dependiendo del diseño, capacidad y área donde se realice el secado.

Para satisfacer las necesidades de los recolectores o productores de chiltepín, considerando obtener un producto de calidad en menor tiempo, libre de contaminación ambiental y utilizando además un proceso económico, existen, como ya se mencionó, varios tipos de secadores solares. En este tipo de secadores pueden reproducirse las condiciones de secado reportadas para chiltepín en secadores de convección forzada utilizando resistencias eléctricas. Sin embargo, se requiere evaluar la eficiencia del tipo de secador y el tiempo de secado, considerando a la par las características de calidad del producto final. Lo anterior dependerá de las características del chiltepín, de las características físicas del secador: el tamaño y capacidad del secador. Otros factores importantes son el tipo, diseño y el área del colector, el flujo de aire y la zona de la región en donde se realice el proceso.

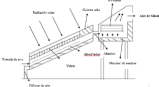
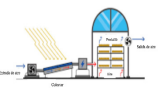

Otro aspecto importante es la capacidad térmica del secador, con la cual se estima el tiempo de secado en donde se alcanza la humedad final deseada y las características de calidad. Por lo anterior, se requiere realizar estos estudios en la comunidad antes de iniciar un proceso de secado en una microempresa. Adaptando y aplicando estas tecnologías a las comunidades rurales, con independencia del año de recolección o producción, con la ventaja de utilizar condiciones de secado reproducibles, se aseguraría un producto de calidad uniforme en el tiempo, siempre y cuando se recolecte el chiltepín bajo las condiciones óptimas de madurez.

CUADRO 1
TIPOS DE SECADORES SOLARES Y SU FUNCIONALIDAD

Alternativa	Tipo	Funcionalidad	Capacidad	Costo
	Gabinete Convección natural	El producto se seca de manera lenta, con la ventaja de estar aislado de la contaminación ambiental. Recomendado para producto con baja humedad.	Baja	Bajo
	Invernadero Convección natural	El producto se seca debido al efecto invernadero. Recomendado para producto con baja humedad.	Media- alta	Bajo- Medio

CUADRO 1

TIPOS DE SECADORES SOLARES Y SU FUNCIONALIDAD (continuación)

Alternativa	Tipo	Funcionalidad	Capacidad	Costo
	Gabinete con colector solar Convección forzada	El producto se seca con mayor rapidez en comparación con el secador tipo gabinete, debido al colector solar y la circulación de aire con que se alimenta al secador (convección forzada). Recomendado para productos de alta humedad.	Baja	Bajo
	Invernadero con colector solar Convección forzada	Se recomienda para mayores demandas de secado. Requieren de un sistema de colección de energía solar y de cubiertas transparentes. Son sistemas un poco más complicados en su instalación y operación. Recomendado para productos de alta humedad.	Media	Medio
	Invernadero fotovoltaico	Se recomienda para mayores demandas de secado. Requieren de un sistema de colección de energía solar y de cubiertas transparentes. Son sistemas un poco más complicados en su instalación y operación. Es recomendado para productos de alta humedad.	Media	Medio

CONCLUSIONES

El chiltepín es un recurso fitogenético de gran valor; es una especie muy apreciada por una población importante de consumidores. Esta aceptabilidad se basa en las características de color y en especial su sabor picante, aunado al aporte de compuestos bioactivos. En las comunidades rurales aún se utiliza el secado al sol a cielo abierto, el cual deteriora en gran parte sus características de calidad. Los secadores solares descritos en este capítulo son una opción viable para las comunidades rurales en

donde se desarrolla y recolecta este fruto. Los costos de inversión y mantenimiento de equipos para una microempresa rural son económicos. Con estas tecnologías es posible utilizar procesos económicos a partir de energías limpias y obtener, a su vez, productos de calidad competitivos en los diferentes mercados, que cumplan además con las normas establecidas. Los recolectores pueden obtener mayores ingresos al adoptar las tecnologías descritas, lo que impactaría en el bienestar de los habitantes de estas regiones rurales.

REFERENCIAS

- AGUILAR, A., Morrell, I., Roose, I., y Seung, K. (2009). “Genetic diversity and structure in semi wild and domesticated chiles (*Capsicum annuum*: *Solanaceae*) from México”, *American Journal of Botany*, 96(6), 1190-1202.
- AIZAWA, K., e Inakuma, T. (2009). “Dietary capsanthin, the main carotenoid in paprika (*Capsicum annuum*), alters plasma high-density lipoprotein-cholesterol levels and hepatic gene expression in rats”, *British Journal of Nutrition*, 102, 1760-1766.
- AKPINAR, E., Midilli, A., y Bicer, Y. (2003). “Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling”, *Energy Conversion and Management*, 44, 1689-1705.
- AKPINAR, E. y BICER (2008). “Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun”. *Energy Conversion and Management* 49, 1367–1375
- ARIMBOOR, R., Natarajan, B., Menon, K., Chandrasekhar, L., y Moorkoth, V. (2015). “Red pepper (*Capsicum annuum*) carotenoids as a source of natural food colors: analysis and stability—A review”, *Journal of Food Science and Technology*, 52(3),1258-1271.
- ARSLAN, D., y Özcan, M. (2011). “Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum* L.): change in drying behavior, color and antioxidant content”, *Food and Bioproducts Processing*, 89, 504-513.
- BAÑUELOS, N., Salido, P., y Gardea, A. (2008). “Etnobotánica del chiltepín: pequeño gran señor en la cultura de los sonorenses”, *Estudios Sociales*, 16(32), 177-205.

- BAENAS, N., Belovićb, M., Ilicb, N., Morenoc, D.A., García-Viguerac, C. (2019). "Industrial use of pepper (*Capsicum annum* L.) derived products: Technological benefits and biological advantages". *Food Chemistry* 274, 872–885.
- CHOI, L., Bong, S., Kozukue E., Kozukue N., Levin C., y Friedman, M. (2006). "Analysis of the contents of pungent compounds in fresh Korean red peppers and in pepper-containing foods", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 9024-9031.
- CONAGUA (2013). *Reporte del clima en México. Reporte anual (2013)*. México: Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional.
- CONTRERAS, M., y Yahia, E. (1998). "Changes in capsaicinoids during development, maturation, and senescence of chile peppers and relation with peroxidase activity", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 2075-2079.
- EL KHADRAOUI, A., Bouadila, S., Kooli S., y Guizani, A. (2017). "Thermal behaviour of indirect solar dryer: nocturnal usage of solar air collector with PCM", *Journal of Cleaner Production*, 148, 37-48.
- EL KHADRAOUI, A., Hamdi, I., Kooli, S., y Guizani, A. (2019). "Drying of red pepper slices in a solar greenhouse dryer and under open sun: experimental and mathematical investigations", *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 262-27.
- FAYOS, O., Ochoa, N., Martínez de la Vega, O., Sabiñón, M., Orduna, J., Mallor, C., Barbero, G., y Garces, A. (2019). "Assessment of capsaicinoid and capsinoid accumulation patterns during fruit development in three chili pepper genotypes (*Capsicum* spp.) Carrying Pun1 and pAMT alleles related to pungency", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67, 12219-12227.
- FUDHOLI, A., Sopian K., Yazdi, M., Ruslan, M., Gabbasa, M., y Kazem, H. (2014). "Performance analysis of solar drying system for red chili", *Sol Energy*, 99, 47-54.
- FUDHOLI, A. and Sopian, K. (2019). "A review of solar air flat plate collector for drying application". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 102: 333-345.

- GETAHUN, E., Delele, M., Gabbiye, N., Fanta, S., y Vanierschot, M. (2021). "Studying the drying characteristics and quality attributes of chili pepper at different maturity stages: experimental and mechanistic model", *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101052
- GIUFFRIDA, D., Germana, P., Bignardi, Ch., Cavazza, A., Corradini, C., y Dugo, G. (2013). "Characterization of 12 Capsicum varieties by evaluation of their carotenoid profile and pungency determination", *Food Chemistry*, 140, 794-802.
- GOETSCH, B., Urquiza, T., Koleff, P., Gasman, F., Aguilar, A., Álavez, V., Iturbide, A., Aragon, G., Carr, F., Castellanos-Morales, C., Cerén, G., Contreras, G., Correa, A., Larios, M., Debouck, L., Delgado, A., Gomez, P., González, M., González, E., Hernández, M., Herrera, B., Jefferson, M., Kell, S., Lira, R., Lorea, F., Martínez, M., Mastretta, A., Maxted, N., Menjívar, J., Guzmán, M., Morale, A., Oliveros, O., Orjuela, R., Pollock, C., Quintana, M., Rodríguez, A., Ruiz, J., Sánchez, J., González, G., Sánchez de la Vega, S., Niedfeldt, M., Tognelli, W., Vargas, O., Vega, M., Wegier, A., Zamora, P., y Jenkins, R. (2021). "Extinction risk of Mesoamerican crop wild relatives", *Plants People Planet*, 3, 775-795.
- GONZÁLEZ, A., Sierra, E., Luna, J., Pérez, R., Ortiz, J., y García, J. (2013). "Characterization of different capsicum varieties by evaluation of their capsaicinoids content by high performance liquid chromatography, determination of pungency and effect of high temperature", *Molecules*, 18, 13471-13486.
- GOYAL, R., y Tiwari, G. (1999). "Performance of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept", *Energy Conversion and Management*, 40(4), 385-392.
- Guía de horticultura de Iowa State University* (2002). "El huerto doméstico". Iowa State University, University Extension, PM 1888 (S). <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1888S.pdf>.
- HA, S., Kim, J., Park, J., Lee, S., y Cho, K. (2007). "A comparison of the carotenoid accumulation in Capsicum varieties that show different ripening colours: deletion of the capsanthin-capsorubin synthase gene is not a prerequisite for the formation of a yellow pepper", *Journal of Experimental Botany*, 58, 3135-3144.

- HERRERA, A., Cervantes, F., Antuna, O., García, J., Rodríguez, D., Rodríguez, S., Enríquez, E., y Mendoza, M. (2018). "Deterioration of the quality of the piquín pepper seed from four collections in Querétaro and Guanajuato", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(8), 1627-1638.
- JITJACK K., Thepa S., Sudprasert K., Pichai N. (2016). "Improvement of a rubber draying greenhouse with a parabolic cover and enhanced panels". *Energy and Buildings*, 124. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.030.
- JIMÉNEZ, J. (2013). "Factores ambientales, fenología e intercambio de gases en *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* (Dunal) Heiser & Pikckergill", tesis de doctorado, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C.
- JIMÉNEZ, D., Vardanega, R., Salinas, F., Espinosa, C., Bugueño, W., Palma, J., Meireles, M., Ruiz, M., y Cerezal, P. (2021). "Effect of drying methods on biorenergy process to obtain capsanthin and phenolic compounds from *Capsicum annuum* L.", *Journal of Supercritical Fluids*, 174, 105241.
- KAEWKIEW, J., Nabnean, S., y Janjai, S. (2012). "Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse types of solar dryer for drying chilli in Thailand", *Procedia Engineering*, 32(2), 433-439.
- KIM, S., Park, J., y Hwang, I. (2002). "Quality attributes of various varieties of Korean red pepper powders (*Capsicum annuum* L.) and color stability during sunlight exposure", *Journal of Food Science*, 67(8), 2957-2961.
- KIM, S., Lee, W., Park, J., Lee, H., y Hwang, L. (2006). "Effect of drying in antioxidant activity and changes of ascorbic acid and color by different drying and storage in Korean red pepper (*Capsicum annuum*, L)", *International Journal of Food Science and Technology*, 41(1), 90-95.
- KIM, S., Lee, W., Park, J., Lee, H., y Hwang, J. (2004). "Composition of main carotenoids in Korean red pepper (*Capsicum annuum*, L.)", *Journal of Food Science*, 69(1), 39-44.

- KOOLI, S., Fadhel, A., Farhat, A., y Belghith, A. (2007). "Drying of red pepper in open sun and greenhouse conditions: mathematical modeling and experimental validation", *Journal of Food Engineering*, 97(53), 1094-1103.
- MAEDA, H., Saito, S., Nakamura, N., y Maoka, T. (2013). "Paprika pigments attenuate obesity-induced inflammation in 3T3-L1 adipocytes", *ISRN Inflammation*, 2013, 763-758.
- MAOKA, T., Akimoto, T., Fujiwara, Y., y Hashimoto, K. (2004). "Structure of new carotenoids with the 6-oxo- end group from the fruits of paprika, *Capsicum annuum*", *Journal of Natural Products*, 67, 115-117.
- MARES, M., y Valiente, J. (2019). "Horticultural aspects for the cultivated production of Piquín Peppers (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) - A review", *HortScience*, 54(1), 70-75.
- MARTÍNEZ, L., Cilia, I., Beltrán, J., y Roncalés, P. (2006). "Effect of *Capsicum annuum* (Red Sweet and Cayenne) and *Piper nigrum* (Black and white) Pepper powders on the shelf life of fresh pork sausages packaged in modified atmosphere", *Journal of Food Science*, 71, 48-53.
- MANGARAJ, S., Singh, A., Samuel, D., y Singhal, O. (2001). "Comparative performance evaluation of different drying methods for chillies", *Journal of Food Science and Technology*, 38(3), 296-299.
- MEDINA, T., Rodríguez del Bosque, L., Villalón, H., Pozo, O., Ramírez, O., López de León, R., Lara, M., Gaona, G., Cardona, A., y Mora, A. (2002). "El chile piquín (*Capsicum annuum* var. *aviculare*) en el noreste de México. Aspectos ecológicos y socioeconómicos", *Revista BIOTAM*, 13, 1-14.
- MONTOYA, L. (2015). "Efecto del método de secado del chiltepin (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) sobre la degradación de compuestos bioactivos", tesis de doctorado, Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos del Instituto Tecnológico de Veracruz.
- MONTOYA, L., Gardea, A., Ayala, G., Martínez, Y., y Robles, L. (2010). "Capsaicinoides y color en chiltepin (*Capsicum annuum* var. *aviculare*) efecto del proceso sobre salsas y encurtidos", *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(2), 1-10.

- MONTOYA, L., González, A., Martínez, Y., Robles, M., García, M., y Rodríguez, G. (2017). "Impact of open sun drying and hot air drying on capsaicin, capsanthin, and ascorbic acid content in chiltepín (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*)", *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 813-825.
- MONFORTE, M., Guzmán, A., Uuh, F., y Vázquez, F. (2010). "Capsaicin accumulation is related to nitrate content in placentas of habanero peppers (*Capsicum chinense* Jacq.)", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90, 764-768.
- MORENO, Y., Hernández, A., López, P., Vanoye, V., Torres, M., y Torres, J. (2019). "Variability in the phytochemical contents and free radical-scavenging capacity of *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* (Wild Piquin Chili)", *Chemistry Biodiversity*, 16(10), e1900381.
- MORALES, A. (2011). "Distribución y diversidad morfológica del chiltepín silvestre (*Capsicum annuum* L. var. *aviculare* Dierb.) en el estado de Sonora, México", ponencia en Foro del Chiltepín, Moctezuma, organizado por la Comisión Nacional Forestal, 25 de marzo.
- MURTHY, R. (2009). "A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 835-844.
- NARISAWA, T., y Fukaura, Y. (2003). "Prevention by intrarectal 5-aminosalicylic acid of N-methylnitrosourea-induced colon cancer in F344 rats", *Diseases of the Colon and Rectum*, 46, 900-903.
- PAGÁN, I., Betancourt, M., Jacinto de Miguel, M., Pinero, D., Fraile, A., y García, F. (2010). "Genomic and biological characterization of chiltepín yellow mosaic virus, a new mycovirus infecting *Capsicum annuum* var. *aviculare* in Mexico", *Archives of Virology*, 155, 675-684.
- PATEL, D. (2019). "Capsanthin: a capsicum plant capsaicinoids with their anticancer potential, biological application and analytical aspects", *Gut & Liver*, 13(6), 114-118.
- PALMA, J., Terán, F., Contreras, A., Rodríguez, M., y Corpas, F. (2020). "Antioxidant profile of pepper (*Capsicum annuum* L.) fruits containing diverse levels of capsaicinoids", *Antioxidants*, 9(9), 1-19.

- POCHONT, N., Mohammad, M., Pradeep, B., y Vijaya, P. (2020). “A comparative study of drying kinetics and quality of Indian red chilli in solar hybrid greenhouse drying and open sun drying”, *Materials Today: Proceedings*, 21, 286-290.
- PRADA, A., Vela, C., Bardález, G., y Saavedra, J. (2019). “Efectividad de un proceso de secado de café usando secadores solares con sistema de flujo de aire continuo impulsado por energía fotovoltaica, en la región San Martín, Perú”, *Información Tecnológica*, 30(6), 85-92.
- PRAKASH, O., y Kumar, A. (2014). “Design, development, and testing of a modified greenhouse dryer under conditions of natural convection”, *Heat Transfer Research*, 45(5), 433-451.
- QUINTANAR, O., y Roa, R. (2017). “Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 321-331.
- RABHA, D., y Muthukumar, P. (2017). “Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax-based latent heat storage system”, *Solar Energy*, 149, 214-226.
- ROBLES, J., y Garza, M. (2015). “Restricciones de mercado y condicionantes a la organización en la comercialización de chiltepin (*Capsicum annuum* L. variedad *glabriusculum*) en el mercado norteamericano”, *Revista Mexicana de Agronegocios*, 36, 1230-1240.
- ROCHIN, G., Gámez, N., Montoya, L., y Medina, L. (2013). “Efecto de los procesos de secado y encurtido sobre la capacidad antioxidante de los fitoquímicos del chiltepin (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*)”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(2), 227-239.
- SAHDEV, R., Kumar, M., y Dhingra, A. (2016). “A review on applications of greenhouse drying and its performance”, *AgricEngInt: CIGR Journal Open Access*, 8(2), 395-412.
- SANGAMITHRA, A., Swamy, G., Prema, R., Priyavarshini, R., Chandrasekar, V., y Sasikala, S. (2014). “An overview of a poly-house dryer, Renew Sustain”, *Energy Reviews*, 40, 902-910.
- SWAMI, M., y Virbhadra, F. (2018). “Experimental analysis of solar fish dryer using phase change material”, *Journal Energy Storage*, 20, 310-315.

- TANAKA, Y., Watachi, M., Nemoto, W., Goto, T., Yoshida, Y., Yasuba, K. I., y Doi, M. (2021). "Capsaicinoid biosynthesis in the pericarp of chili pepper fruits is associated with a placental septum-like transcriptome profile and tissue structure", *Plant Cell Reports*, 40, 1859-1874.
- TEJAS, R., Servín, A., Nieto-Garibay, R., y Marín, A. (2011). "Record of *Plagiometriona clavata* (Fabricius 1798) (Coleoptera: Chrysomelidae) on wild chili *Capsicum annuum*, of Baja California Sur, Mexico", *Acta Zoológica Mexicana*, 27(1), 201-205.
- TOPUZ, A., Dincer, C., Sultan, K., Feng, H., y Kushad, M. (2011). "Influence of different drying methods on carotenoids and capsaicinoids of paprika (Cv., Jalapeño)", *Food Chemistry*, 129, 860-865.
- TRETO, T., Torres, J., Contreras, R., y Moreno, Y. (2021). "Enriquecimiento del aceite comestible por compuestos fenólicos y antioxidantes de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*)", *CienciaUAT*, 15(2), 156-168.
- UMARU, S. (2018). "Development and performance comparison of mixed-mode solar dryer crop dryer with and without thermal storage", *Renewable Energy*, 128, 285-298.
- VÁZQUEZ, A., Góngora, O., Olivas, I., Muñoz, O., Osuna P., Rodrigo, J., de la Rosa, L., y Álvarez, E. (2020). "Pytochemical profile and antioxidant activity of chiltepin chili (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*), Sonora, Mexico", *Journal Food Bioactives*, 11, 57-65.
- VEGA, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus, R., Miranda, M., López, J., y Pérez, M. (2009). "Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, color and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum* L. var. *hungarianum*)", *Food Chemistry*, 117, 647-653.
- VERA, A., Chávez, J., Carrillo, J., y López, M. (2011). "Phytochemical evaluation of wild and cultivated pepper (*Capsicum annuum* L. and *C. pubescens* Ruiz & Pav.) from Oaxaca, Mexico", *Chilean Journal Agricultural Research*, 71(4), 134-138.

- WU, J., Chien, Y., Tsai, I., Hung, C., Huang, W., Liu, L., y Yu, Y. (2021). “Capsanthin induces G1/S phase arrest, erlotinib-sensitivity and inhibits tumor progression by suppressing EZH2-mediated epigenetically silencing of p21 in triple-negative breast cancer cells”, *Aging (Albany NY)*, 13(9), 12514.
- WU, T., Gao, Y., Hao, J., Geng, J., Zhang, J., Yin, J., Liu, R., Sui, W., Gong, L., y Zhang, M. (2020). “Capsanthin extract prevents obesity, reduces serum TMAO levels and modulates the gut microbiota composition in high-fat-diet induced obese C57BL/6J mice”, *Food Research International*, 128, 108774.
- ZHANG, H., Gowing, J., Degreve, L., y Baeyens, T. (2016). “Use of particle heat carriers in the stirling engine concept”, *Energy Technology*, 4(3), 401-408.

CAPÍTULO 10
LA AGRICULTURA ORGÁNICA
UN ACERCAMIENTO A LA AGRICULTURA
SOSTENIBLE EN BAJA CALIFORNIA SUR

ALEJANDRA NIETO-GARIBAY¹
ENRIQUE TROYO-DIÉGUEZ²
MARTÍN AGUILAR-GARCÍA³
FÉLIX ALFREDO BELTRÁN-MORALES⁴
BERNARDO MURILLO-AMADOR⁵

RESUMEN

El presente capítulo tiene el objetivo de proporcionar al lector la información necesaria para explorar la situación de la agricultura orgánica que se practica en Baja California Sur como ejemplo de una agricultura sustentable. Se trata, mediante números y estadísticas, sobre la situación de la producción orgánica frente a la convencional, los principales cultivos orgánicos y su contribución a diferentes niveles gubernamentales. Ofrece un panorama general del contexto ambiental, incluyendo los recursos naturales de los que echa mano este tipo de agricultura. Se mencionan los principios y principales prácticas de la agricultura orgánica, para así analizar sus efectos a largo plazo y definir su sustentabilidad. Se explica el proceso de certificación y de inocuidad por medio de la gestión de la seguridad alimentaria en estos sistemas orgánicos.

PALABRAS CLAVE: agricultura orgánica, certificación, inocuidad, salud alimentaria, sustentabilidad agrícola.

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR). Autora de correspondencia: anieto04@cibnor.mx.

² Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR).

³ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR).

⁴ Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS).

⁵ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR).

INTRODUCCIÓN

En la actualidad uno de los mayores retos de la humanidad en los próximos años es cubrir la demanda de alimentos para las generaciones futuras. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2017), para el año 2050 la población mundial aumentará y alcanzará casi los 9 700 millones de personas. En el mismo documento, la FAO cita una reflexión acerca de que las capacidades de cumplir esta demanda y lograr los incrementos necesarios en la producción en un contexto de cambio climático, incluso si hacerlo significa someter aún a mayor presión las tierras y recursos hídricos ya mermados.

La reflexión ha llevado al clamor de una agricultura que asegure una producción estable de alimentos y que sea acorde con la calidad ambiental. Entre otros, los objetivos que se persiguen son la seguridad alimentaria, erradicar la pobreza, conservar y proteger el ambiente y los recursos naturales (Altieri y Nicholls, 2000). Como parte de la solución, nace la agricultura orgánica, también llamada ecológica, cuyo concepto se originó en diferentes lugares en el mundo, con diversos enfoques. Los movimientos campesinos e indígenas en América Latina, Japón e India, por ejemplo, reconocieron el valor de la diversidad biológica y cultural, siendo uno solo el pensamiento sobre la alimentación y la agricultura (Duram, 2000). Este tipo de agricultura se caracteriza por garantizar la salud humana y ambiental, así como por la equidad bajo los principios que se manejan por medio de la Federación Internacional de Movimientos de Producción Orgánica, conocida en inglés como IFOAM (IFOAM, 2014), como una agricultura sustentable. Definiendo como sustentable “cubrir las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de futuras generaciones para cubrir sus propias necesidades; preservando un balance ecológico evitando el deterioro o destrucción de los recursos naturales” (IFOAM, 2014). Para el cumplimiento de estos principios, deben realizarse acciones específicas que lleven a la sustentabilidad durante la producción de alimentos. Existen estudios que comprueban que el uso de insumos de origen natural (*e.g.* abonos orgánicos) y prácticas (*e.g.* labranza de conservación) permiten la preservación de la materia orgánica en el suelo, y con ello, los beneficios que le otorga a éste para el soporte de la producción vegetal de manera sostenida (López-Martínez *et al.*,

2000). Los insumos también incluyen aquellos que controlan plagas y enfermedades a través de uso de sus enemigos naturales (control biológico) o de la aplicación de repelentes (por aplicación o como cultivo de acompañamiento) (Cabrera *et al.*, 2016).

Como el concepto de agricultura orgánica es por definición incluyente e integrador, involucra los aspectos sociales, económicos, comerciales, técnicos y agroecológicos. Por ello, el rescate de prácticas ancestrales de la agricultura que conllevan la conservación de ecosistema es de vital importancia para este tipo de agricultura. Lo mismo, el aspecto social y económico que involucra la autosuficiencia de la parcela o granja en su producción, el aseguramiento de las necesidades de autoconsumo y la venta a precio justo del producto.

En Baja California Sur, estas prácticas forman parte de la producción orgánica, y se tiene registro de ellas desde 1986, cuando se organizan los ejidatarios para la creación de una empresa y cooperativa de pequeños productores, quienes, familiarizándose con la normatividad de la agricultura orgánica certificada, empezaron a producir y exportar estos alimentos (García-Hernández *et al.*, 2006). De acuerdo con Arias (2015), Baja California Sur (BCS) fue el primer estado en producir una importante cantidad de orgánicos para el país, registrando 568 hectáreas en 1997; los principales cultivos sembrados en dicho año fueron albahaca (396 hectáreas), ajo (45 hectáreas) y tomate cherry (40 hectáreas). En 2020, el SIAP reporta una superficie de siembra de 1 362.95 hectáreas y 1 354.95 hectáreas cosechadas con un máximo de 22 cultivos orgánicos. Los números comparativos entre la práctica de la agricultura orgánica y la convencional en BCS permiten visualizar la aportación de la agricultura orgánica como una agricultura sustentable en el estado.

Otro aspecto no menos importante son los recursos naturales y las características ambientales en que se desarrolla la agricultura en el estado, cómo se aprovechan y se preservan para la producción de alimentos. Debido a que los principios de la agricultura orgánica son la salud ambiental y humana, la inocuidad de la producción de alimentos es una parte vital para este tipo de agricultura. En consecuencia, es necesario entender las buenas prácticas agrícolas, las normas de certificación y las acciones que la rigen.

El presente capítulo aborda la agricultura orgánica en números y la compara con la agricultura convencional, que para efectos del capítulo la definimos como aquella que no sigue los principios de las prácticas orgánicas. Se plantea el manejo de los recursos naturales, certificación y la inocuidad como temas centrales de la agricultura orgánica. De tal manera que el lector encuentre datos y aspectos interesantes de la agricultura orgánica en Baja California Sur como un ejemplo acercado a la producción sustentable de alimentos vegetales.

LA AGRICULTURA ORGÁNICA Y LA SUSTENTABILIDAD

La práctica de la agricultura orgánica en el mundo se ha incrementado; las principales razones obedecen a una mayor preocupación por el consumo de alimentos sanos y una forma de producción que sea compatible con el cuidado del ambiente. De acuerdo con la Federación Internacional de Movimientos de Producción Orgánica (IFOAM), “la agricultura insostenible es el principal impulsor de la pérdida de biodiversidad, está contribuyendo al calentamiento global, contaminando el suelo, amenazando los medios de vida rurales, así como la seguridad alimentaria y nutricional” (<https://www.ifoam.bio/why-organic>). Lo anterior se fundamenta en diversos estudios realizados sobre el impacto del uso de agroquímicos en la disminución de la fertilidad del suelo, la pérdida de biodiversidad, la contaminación del aire, el agua y la deforestación (López-Pérez *et al.*, 2017).

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2012) menciona que la actividad agrícola ha provocado efectos negativos debido al uso de agroquímicos, donde se ha afectado a cerca de 18% del territorio nacional. De ahí surge entonces la demanda del cuidado del ambiente y de la producción de alimentos que garanticen tanto la salud humana como la ambiental. De esta manera, el IFOAM (2014) define la agricultura orgánica como “un sistema de producción que mantiene y mejora la salud de los suelos, los ecosistemas y las personas. Se basa fundamentalmente en los procesos ecológicos, la biodiversidad y los ciclos adaptados a las condiciones locales, sin usar insumos que tengan efectos adversos. La agricultura orgánica combina tradición, innovación

y ciencia para favorecer el medio ambiente que compartimos y promover relaciones justas y una buena calidad de vida para todos los que participan en ella”. Esta definición establece los principios que rigen la agricultura orgánica y que surgen como precepto para todos aquellos que desean producir alimentos sanos y preservar los recursos naturales pensando en las futuras generaciones. Estos principios se explican a continuación de acuerdo con la IFOAM (2014).

- *Principio de salud.* La agricultura orgánica debe sostener y promover la salud de suelo, planta, animal, persona y planeta como una sola e indivisible.
- *Principio de ecología.* Debe estar basada en sistemas y ciclos ecológicos vivos, trabajar con ellos, emularlos y ayudar a sostenerlos.
- *Principio de equidad.* Debe basarse en relaciones que aseguren equidad con respecto al ambiente común y a las oportunidades de vida.
- *Principio de precaución.* Debe gestionarse de manera responsable y con precaución para proteger la salud, el bienestar de las generaciones presentes y futuras, además del ambiente.

Estos principios buscan una producción orgánica sustentable abordando las principales áreas que la involucran: producción, ambiente, economía y bienestar (Reganold y Wachter, 2016). Todos los principios se encuentran relacionados entre sí, por lo que explican la complejidad de la sustentabilidad agrícola y difícilmente se pueden abordar de forma separada. El cuadro 1 resume las recomendaciones que deben tomarse en cuenta en la agricultura orgánica y que se plantean dentro de las normas básicas del IFOAM (2011).

El cuidado de la biodiversidad, canalizar debidamente los residuos originados y el cuidado del agua son ejemplos de un ambiente saludable y que puede ser preservado con todo y la producción de alimentos. El aspecto social desde el punto de vista de las acciones inherentes a los derechos humanos y laborales, así como los aspectos económicos que se muestran en el cuadro 1, deben tomarse en cuenta para que la agricultura realmente sea sustentable.

Si los aspectos sociales, ambientales y económicos que se muestran en el cuadro 1 son importantes para la agricultura orgánica en cualquier

zona donde se practique, se vuelve más importante en las regiones áridas y semiáridas, en donde las características adversas a las que se enfrenta la producción de alimentos son la escasez de agua, las altas temperaturas, altas tasas de radiación y de evaporación.

CUADRO 1

RECOMENDACIONES PARA LA PRÁCTICA DE LA AGRICULTURA ORGÁNICA DE ACUERDO CON LAS NORMAS BÁSICAS DE LA FEDERACIÓN INTERNACIONAL DE MOVIMIENTOS DE PRODUCCIÓN ORGÁNICA (IFOAM, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS)

Medio ambiente	Social	Económica
<p>Biodiversidad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hábitat o ecosistema. • Vida silvestre. • Densidad/diversidad de la flora. • Densidad/diversidad de la acuicultura. • Exclusión de tierras. • Nichos ecológicos. <p>Residuos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Envasado de productos en la cadena de valor. <p>Agua</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estrategias de gestión/uso definidas. • Reducción de agua mediante la prevención. • Reutilización de materiales para reducir los residuos. • Reciclaje del agua. • Vertido de aguas residuales grises y escorrentía. 	<p>Derechos sociales/humanos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Promoción/mejora de la educación. • Promoción/mejora de la asistencia médica. • Existen instalaciones sanitarias y viviendas. • Cuestiones de género. • Derechos de la mujer en el trabajo. • Derechos culturales/religiosos (OIT 169). • Derechos de los indígenas. <p>Derechos del trabajo/laborales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de trabajo. • Seguridad en el trabajo (OIT 184). • Equipos de seguridad y materiales de emergencia. • Acceso al agua potable. • Condiciones de empleo. • Políticas y prácticas de la contratación de mano de obra. • Contratos escritos. • Se especifican claramente los días de licencia. • Pensiones y beneficios de la seguridad social. 	<p>Administración y gestión</p> <ul style="list-style-type: none"> • Criterios para la gestión de la calidad. • Mejores prácticas de gestión de la calidad. • Especificaciones sobre la calidad del producto. • Cuestiones de salud y seguridad.

Fuente: Modificado de IFOAM (2011).

LA AGRICULTURA EN BAJA CALIFORNIA SUR EN NÚMEROS

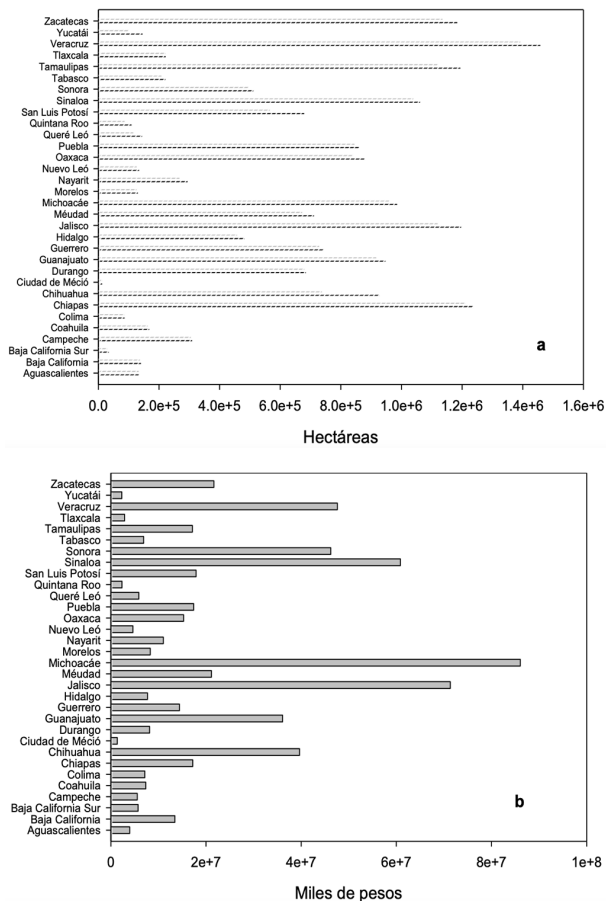
En este apartado se menciona la información numérica de los dos tipos principales de agricultura que se practican en Baja California Sur para la producción de alimentos vegetales:

Agricultura convencional

Los suelos en Baja California Sur se caracterizan por tener menos del 1% de materia orgánica y se clasifican como franco-arenosos (FAO, 2013). De acuerdo con datos del SIAP (2020), Baja California Sur (BCS) contribuye con un 3.8% de la producción agrícola del país en hectáreas sembradas y un 3.8% cosechada, que corresponde a un 1.1% del total del valor de la producción. Ocupa el penúltimo lugar de la superficie sembrada y cosechada en el país (figuras 1a, 1b), así como el lugar número 30 en cuanto al valor de producción.

Las prácticas de la agricultura en Baja California Sur que corresponden a la agricultura convencional incluyen el uso de agroquímicos tanto para el control de plagas y enfermedades como para la fertilización de los cultivos, además de la siembra de grandes superficies de un solo cultivo. La agricultura convencional contribuye con 0.19% de la superficie sembrada total en el país, un valor de la producción del 0.79% y un 0.17% de superficie cosechada de los totales de este tipo de agricultura. El 0.19% de la superficie sembrada, el 0.16% de la superficie cosechada y el 27.4% del valor de la producción son los porcentajes que contribuyen a la venta nacional total de los productos agrícolas cultivados de forma convencional. La superficie sembrada a cielo abierto de la agricultura convencional en BCS es de un 91.2%, el porcentaje restante de este tipo de agricultura corresponde a siembras en invernadero (1.4%) y malla sombra (3.8%) (SIAP, 2020).

FIGURA 1



Agricultura orgánica

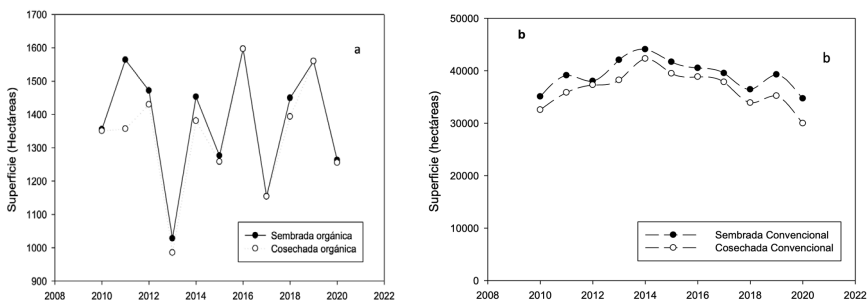
La agricultura orgánica de Baja California Sur contribuye en 2020 (SIAP), en el país, con un 2.3% y 2.5% de la superficie sembrada y cosechada (respectivamente), así como un 12% del valor de la producción. La siembra orgánica, al igual que la convencional, se realiza bajo diferentes modalidades, a cielo abierto y como agricultura protegida. En la primera

modalidad, el porcentaje de la superficie sembrada es de 0.95% y la cosechada es de 1%, mientras que en el valor de la producción orgánica contribuye con un 11% en el país. En la segunda modalidad, los cultivos bajo malla sombra son los que mejor representan la agricultura orgánica con una superficie sembrada y cosechada que representa el 64.72% del total de este tipo de producción en el estado, cuyo valor de la producción representa el 59.7%.

La agricultura orgánica: números y sustentabilidad

El valor de la producción orgánica en Baja California Sur en los últimos diez años ha ido en aumento más de tres veces de 2010 a 2020 (169.11 a 560.35 miles de pesos, respectivamente), mientras que la convencional, poco más del doble (2010 = 2 295 964.99; a 2020 = 4 966 960.54 pesos). Algo que llama la atención es que en ambos casos la superficie sembrada y cosechada se ha mantenido en este mismo periodo de años (figuras 2a, 2b); sin embargo, la tendencia del incremento en el valor de la producción ha sido mayor para la producción orgánica (figuras 3a, 3b). El valor de la producción de la agricultura orgánica aporta un porcentaje significativo al país, con el 12%. Lo anterior refuerza el hecho de que la agricultura orgánica sigue teniendo un valor adicional frente a la agricultura convencional.

FIGURA 2

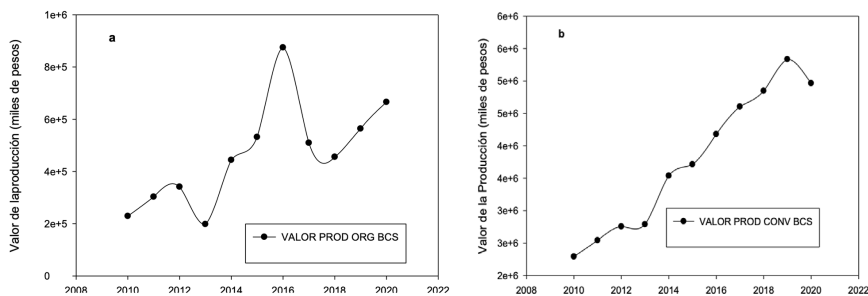


a) Superficie sembrada y cosechada en Baja California Sur, de cultivos orgánicos.

b) Cultivos convencionales a través de los años.

Fuente: SIAP (2020).

FIGURA 3



a) Valor de la producción de la agricultura orgánica en Baja California Sur a través de los años. b) Valor para la agricultura convencional.

Fuente: SIAP (2020).

Por otro lado, el valor de producción de cada hectárea sembrada y cosechada promedio en los últimos diez años en la producción orgánica es de 343.84 miles de pesos, mientras que con agricultura convencional es de 95.72 miles de pesos (datos calculados con información del SIAP, 2020). Si bien en los dos casos se mantiene la superficie de siembra con poca fluctuación, es importante decir que las normas de la agricultura orgánica implican superficies de siembra de menos de una hectárea por tipo de cultivos y donde es fácil apreciar los policultivos que fomentan la diversidad de las especies de animales para el agroecosistema y una mayor salud de éste (figura 4). Los efectos del manejo de superficies más pequeñas de policultivos comparadas con la enorme cantidad de hectáreas de producción convencional permiten beneficios como el mayor control de plagas y enfermedades, mayor diversidad biológica y mayor conservación del suelo.

FIGURA 4

a) Parcela de siembra convencional de monocultivo.
b) Parcela orgánica con policultivo. Ambos en Baja California Sur.

Fuente: Alejandra Nieto Garibay.

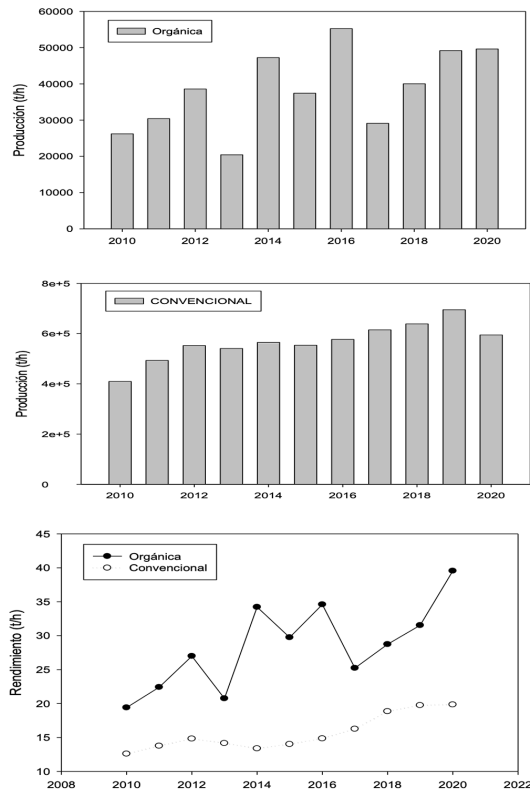
El valor adicional de los productos orgánicos es uno de los grandes atractivos de este tipo de agricultura, pero, más allá de esta parte comercial,

está el aspecto ambiental y de los recursos naturales. Al analizar los datos, se observa que a lo largo de diez años la producción se incrementa para la agricultura convencional, pero no de manera significativa para la orgánica (figuras 5a, 5b).

Cuando se analizan los datos de rendimiento, se observa que ambos tipos de agricultura se incrementan en el tiempo; pero, en el caso de la agricultura orgánica, la magnitud de este incremento es mayor que en la agricultura convencional. Las variables de producción y rendimiento, de acuerdo con el diccionario de los datos del SIAP (2020), denotan la producción por hectárea de los cultivos. El hecho de que la producción de los cultivos convencionales se incremente sin el aumento de la superficie de siembra puede representar una buena señal desde el punto de vista ambiental, lo que significa que la producción aumenta sin la necesidad de la apertura de más tierra para la agricultura, que a su vez significa muy probablemente menos desmontes de la vegetación natural.

Por otro lado, y de acuerdo con la definición de rendimiento, esta variable ofrece más información de la capacidad de suelo y la eficacia de siembra. Un suelo fértil representa más oportunidad para mayores rendimientos en los cultivos. De acuerdo con esto, ambos tipos de agricultura han tenido en los últimos diez años un incremento en el rendimiento (figuras 5a, 5b); sin embargo, la magnitud con que esta variable se incrementa es el doble de 2010 a 2020, cuando la modalidad es orgánica. Mientras que, en el caso de la agricultura convencional, el incremento es mínimo (figura 2b).

FIGURA 5



a) Producción. b) Rendimiento, de cultivos orgánicos en Baja California Sur a lo largo del tiempo.

Fuente: SIAP (2020).

Como ya se comentó antes, los principios de esta agricultura incluyen actividades que permiten que los suelos cuenten con las condiciones biológicas y físico-químicas para seguir produciendo. Estas actividades provocan la mejora y preservación del suelo, principalmente al aumentar o conservar la materia orgánica de él, y de acuerdo con estudios científicos, entre los múltiples beneficios que le otorga está el fomentar la vida microbiana, sobre todo de organismos benéficos para las plantas que ayudan en los ciclos de nutrientes (FAO, 2013; Maya, 2011). En consecuencia, los suelos pueden contar con las condiciones adecuadas para

que las plantas se desarrollen mejor que suelos que no cuentan con estos beneficios. Estudios con especies como el orégano (Murillo-Amador *et al.*, 2015) muestran que el rendimiento mejora con el uso de bocashi, un tipo de abono orgánico parecido a la composta en suelos franco-arenosos característicos de Baja California Sur.

La agricultura orgánica no sólo se limita al uso de la composta como abono orgánico, Beltrán-Morales *et al.* (2019) realizan un análisis de nutrientes en seis diferentes fertilizantes naturales que pueden ser utilizados en este tipo de agricultura: estiércol de vaca, gallinaza, la lombricomposta, lombricomposta comercial, guano de pato y guano de murciélago producidos en Baja California Sur. Además del valor nutricional de los fertilizantes, la inocuidad es otro aspecto en que la agricultura orgánica es rígida en su normatividad (Roussos *et al.*, 2017). Toda aquella enmienda, abono o fertilizante natural utilizada en la agricultura orgánica debe garantizar que no tiene elementos ni patógenos para la salud humana y del ambiente.

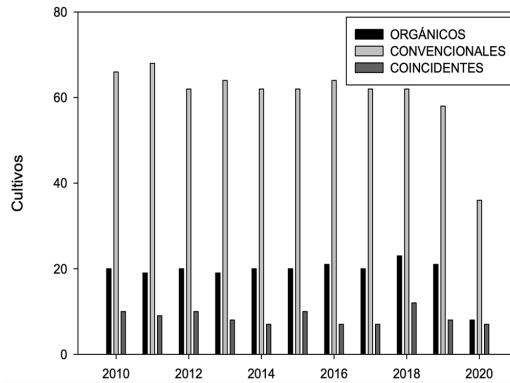
Los abonos orgánicos proporcionan al suelo los nutrientes y condiciones necesarias para que éste sea fértil; y, a diferencia de con el uso de agroquímicos, la fertilidad se mantiene por tiempo prolongado. A su vez, la fertilidad es causante de altos rendimientos debido a que permite la máxima producción del suelo.

Cultivos orgánicos

Los cultivos que se producen de forma orgánica en Baja California Sur y cuya siembra se ha mantenido de diez años a la fecha son albahaca, berenjena, betabel, calabacita, chay, chícharo, chile verde, chives, cilantro, ejote, eneldo, espárrago, fresa, mejorana, menta, orégano, pepino, romero, salvia, tarragón (estragón), tomate rojo (jitomate) y tomillo. Es decir, la producción orgánica certificada se limita a veintidós cultivos que aparecen registrados como orgánicos (SIAP, 2020). De estos cultivos el ajo, albahaca, berenjena, betabel, calabacita, chícharo, chile verde, cilantro, ejote, fresa, pepino y tomate rojo (jitomate) se producen también de forma convencional. Esta última forma de producción presenta una mayor diversidad de cultivos que la orgánica (figura 6); el número de

cultivos que se siembra de forma convencional son más de sesenta.

FIGURA 6

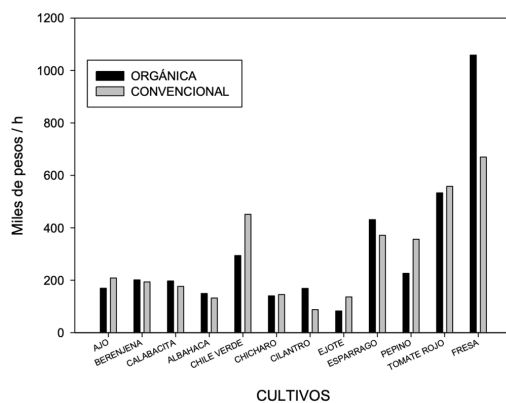


Número de cultivos en Baja California Sur que se producen de forma orgánica, convencional y aquellos que se producen de las dos formas (coincidentes).

Fuente: SIAP (2020).

De los doce cultivos que se siembran bajo los dos tipos de agriculturas orgánica y convencional, seis de ellos –berenjena, calabacita, albahaca, cilantro, espárrago y fresa–, cultivados de forma orgánica, presentan un mayor valor de la producción por hectárea cosechada (figura 7). El cultivo de la fresa es el que representa un mayor valor de la producción de los cultivos orgánicos, con una tercera parte respecto de su cultivo convencional (figura 7). Este resultado denota la preferencia que los agricultores tienen por los orgánicos, lo cual es entendible por el valor agregado que conllevan (Bui y Nguyen, 2021). Más allá de eso, es una buena señal para el ambiente y la producción sana que emula la agricultura orgánica.

FIGURA 7

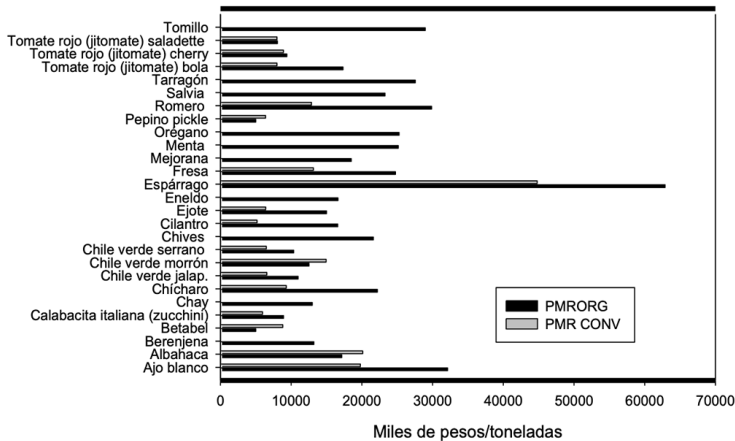


Valor en miles de pesos por hectárea sembrada de cada cultivo sembrado de forma orgánica y convencional en Baja California Sur.

Fuente: SIAP (2020).

Dentro de los aspectos más importantes que caracterizan la sustentabilidad en la agricultura, está la repercusión socioeconómica, y uno de los indicadores que permite comparar el beneficio de este tipo de agricultura con la convencional es el precio medio rural (PMR). El PMR se define como el precio pagado al productor en la venta de primera mano en su parcela o predio, o en la zona de producción (CEDRSSA, 2020). De acuerdo con datos de Sistema de Información Agroalimentaria de Consultas (Siacon, 2018), el PMR de los productos orgánicos es mayor en 24 de los 27 cultivos que se comparan en la figura 8. El pago de un mayor PMR por los cultivos es más atractivo. Sumado al mayor valor de la producción que se comentó en el párrafo anterior, fomenta que los agricultores opten por la práctica de una agricultura orgánica y los principios que conlleva.

FIGURA 8



Precio medio rural (PMR) de los cultivos que se siembran de forma orgánica (PMR ORG) y convencional (PMR CONV) en Baja California Sur.

Fuente: SIACON (2018).

ASPECTOS HIDROLÓGICOS CLAVE PARA LA AGRICULTURA ORGÁNICA EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS DE BAJA CALIFORNIA SUR

Se pueden distinguir varias condiciones básicas entre las regiones desérticas y otras zonas desde un punto de vista hidrológico: (a) algunos eventos de lluvia, a menudo intensos, con una baja cantidad de precipitación anual, lo que hace que la mayoría de los ríos pequeños estén activos sólo un algunos meses o semanas cada año, y a veces sólo una vez cada pocos años; (b) pérdida de la fertilidad del suelo y desarrollo de una “corteza desértica” en la superficie de la tierra; (c) comúnmente, el acuífero se caracteriza por una zona vadosa espesa, la zona entre el nivel freático y la superficie terrestre, lo que resulta en un nivel freático profundo; y (d) la exacerbación de los problemas relacionados con la salinidad, tanto en recursos como en aguas subterráneas y suelos.

EFFECTOS DE LA AGRICULTURA CONVENCIONAL Y ORGÁNICA EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES

Los efectos perjudiciales que la agricultura intensiva produce son la erosión del suelo y la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales. Como parte de los agroquímicos, están los fertilizantes y plaguicidas. Con el uso exagerado de ambos, aplicados a través del agua de riego, se infiltran a través del suelo. Al llevar una gran cantidad de sustancias contenidas en los fertilizantes y plaguicidas, y debido a su alta solubilidad, provocan la contaminación de los acuíferos. La parte del agua que no se infiltra y que fluye como aguas superficiales llega a los ríos o mares con grandes cantidades de estos agroquímicos y provoca eutroficación (Peiyue *et al.*, 2021).

Los plaguicidas, por otra parte, causan la muerte de plantas y animales en los cuerpos de agua. A diferencia de la agricultura intensiva y convencional, la agricultura orgánica no emplea plaguicidas y fertilizantes sintéticos, y por tanto, no existe el riesgo de esta contaminación en las aguas subterráneas y superficiales (Ifoam, 2014). Los menores índices de filtración de nitratos en la agricultura orgánica se deben a la prohibición del uso de fertilizantes y a la disminución en la concentración del ganado en áreas circundantes. Los compuestos nitrogenados son un claro ejemplo de los fertilizantes limitados.

Estas limitaciones impuestas por la normativa de la agricultura orgánica dieron como resultado la escasa presencia –en términos económicos– de nitrógeno en los establecimientos orgánicos. Las consecuencias de la falta de nitrógeno en los establecimientos orgánicos son notables: los costos de oportunidad (costo de producción en la granja) de 1 kg de nitrógeno en los establecimientos orgánicos pueden superar entre siete y dieciséis veces el costo de los fertilizantes N minerales. En consecuencia, al contrario de lo que ocurre en las granjas convencionales, donde el abono y los lodos son en general un problema de deshechos, los agricultores orgánicos se ven obligados a desarrollar estrategias eficientes en el manejo del nitrógeno (López-Pérez *et al.*, 2017).

Comprender la formación y las propiedades de la “corteza desértica”, así como el desarrollo de métodos de ingeniería para romperla, es esencial para controlar la proporción de escorrentía-infiltración (recarga) y para mantener actividades agrícolas exitosas.

LA AGRICULTURA ORGÁNICA Y EL MEJORAMIENTO DEL SUELO

El contenido de materia orgánica es importante para el suelo por su capacidad de limitar el daño físico y de mejorar la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica. Los estudios que se realizan sobre este tema se concentran en la medición del contenido de carbono orgánico. La investigación conducida por Stolze *et al.* (2000) muestra que la agricultura orgánica tiene efectos beneficiosos sobre las características de la materia orgánica porque el contenido de carbono orgánico es más alto en los suelos cultivados orgánicamente que en los convencionales. La fertilización se realiza con sustancias orgánicas; por ejemplo, estiércol de corrales, composta, abonos verdes, residuos de plantas y fertilizantes N-orgánicos de uso comercial. La humedad, la temperatura y el oxígeno influyen sobre los procesos de mineralización y de descomposición, en los que el tipo de suelo desempeña una función importante. Los suelos arenosos se deshidratan rápidamente y el proceso de descomposición se hace más lento; por el contrario, los suelos ferralíticos en general no son muy fértiles, pero favorecen la rápida descomposición y la formación de materia orgánica estable.

Ensayos realizados por el Instituto Suizo de Investigación de la Agricultura Orgánica (FiBL) ofrecen una exhaustiva comparación de los parámetros de los suelos manejados con métodos convencionales y los que utilizan técnicas orgánicas. A continuación, se resumen los resultados que se han reportado a la fecha:

- Gracias a los métodos de fertilización orgánica, el contenido de materia orgánica es mayor en los suelos trabajados orgánicamente que en los suelos de explotación tradicional, que han sido fertilizados de forma exclusiva con minerales.
- El alto contenido de materia orgánica contribuye a evitar la acidificación del suelo.
- El manejo orgánico mejora la estructura del suelo e incrementa su actividad microbiológica, al tiempo que reduce el riesgo de erosión.
- Los cultivos orgánicos se benefician con la simbiosis de las raíces y aprovechan mejor las propiedades del suelo.

- Los suelos de los cultivos orgánicos trabajados con labranza de conservación muestran una actividad biológica (lombrices, hongos, bacterias, microorganismos) mucho mayor que los labrados en forma tradicional. Los nutrientes se transforman rápidamente y con ello se mejora la estructura del suelo.
- El manejo orgánico estimula el desarrollo de la fauna del suelo; por ejemplo, las lombrices y los artrópodos de superficie, y mejora las condiciones de crecimiento del cultivo. Una mayor cantidad de predadores ayuda a controlar los organismos perjudiciales.
- El manejo orgánico mejora la estructura del suelo al incrementar su actividad biológica y reducir el riesgo de erosión.

PROCESO DE CERTIFICACIÓN EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ORGÁNICA

La agricultura orgánica tiene sus raíces en los movimientos de “cultivo de humus” que se extendieron por Gran Bretaña y Europa continental desde la década de 1920 hasta 1950. Estos movimientos evolucionaron en gran parte como respuesta al uso cada vez mayor de fertilizantes y pesticidas sintéticos. Los defensores del “cultivo de humus” creían que los alimentos de la más alta calidad y la sostenibilidad de la agricultura se lograban “alimentando el suelo”, lo que fomentaba la fertilidad de éste. Su objetivo era aumentar el contenido de humus, la materia orgánica completamente descompuesta que ha alcanzado un estado estable en el suelo. El crecimiento de la industria orgánica durante esta era llevó al establecimiento de estándares y certificación de terceros. La certificación de terceros es un proceso de evaluación que se lleva a cabo para verificar el cumplimiento de las normas. Involucra al productor (agricultor), el consumidor (comprador) y un tercero, el agente certificador, que afirma que el producto se produce de acuerdo con las regulaciones orgánicas (Coleman, 2012).

A medida que la industria orgánica se expandió durante la década de 1980, diferentes certificadores desarrollaron sus propios estándares y procesos de certificación. Como resultado, algunos certificadores no aceptaron la validez de la certificación orgánica de otros certificadores.

Estas disparidades entre los estándares de los certificadores dieron como resultado barreras al comercio, lo que llevó a muchos a creer que se necesitaba un conjunto coherente de estándares (Kuepper, 2002).

Las regulaciones incluyen requisitos de certificación que los productores deben cumplir para vender sus productos como orgánicos. La certificación orgánica es el proceso de verificar el cumplimiento de las regulaciones orgánicas. El proceso de evaluación lo lleva a cabo un certificador externo, un organismo independiente que no está vinculado ni al vendedor (el agricultor) ni al comprador. Por ejemplo, los productos que se venden como orgánicos en Estados Unidos deben estar certificados como orgánicos según las regulaciones y deben estar certificados por un agente certificador acreditado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Coleman, 2012).

Muchos otros países, incluidos Japón y los miembros de la Unión Europea (UE), tienen sus propios estándares para productos orgánicos. Los productores orgánicos que planean exportar sus productos (o venderlos a distribuidores que pueden exportarlos) deben preguntar a sus compradores si necesitan estar certificados con estándares adicionales, así como con las regulaciones orgánicas del USDA. Los estándares adicionales se refieren a los reglamentos propios de cada país. Estados Unidos tiene acuerdos de equivalencia con Canadá y, a partir del 1 de junio de 2012, con la UE.

Los productos orgánicos certificados según las regulaciones orgánicas del USDA pueden venderse, etiquetarse y representarse como orgánicos en Canadá y los países miembros de la UE. Este arreglo elimina la necesidad de que las operaciones orgánicas de Estados Unidos tengan una certificación separada de los estándares canadienses o de la UE, y viceversa. Hay algunas excepciones a esta equivalencia, llamadas “variaciones críticas”. Por ejemplo, una variación crítica para los alimentos con destino a la UE es que los cultivos producidos con antibióticos (estreptomicina para el control del fuego bacteriano en manzanas y peras) no pueden venderse como orgánicos en la UE según el acuerdo (Coleman, 2012).

Las regulaciones orgánicas del USDA también incluyen requisitos generales para la acreditación que establecen los requisitos que los certificadores deben cumplir para emitir certificados orgánicos. Los procesos para la certificación de fincas y la acreditación de certificadores son

similares: una solicitud que describe los procedimientos de la operación, una inspección en el sitio y un informe que indica los cambios que se deben realizar para cumplir con las regulaciones. Este proceso de acreditación asegura que todos los certificadores apliquen las regulaciones de la misma manera (Coleman, 2012).

Hay dos categorías de operaciones orgánicas: productores y manipuladores. Los productores orgánicos pueden cultivar cosechas, recolectar plantas silvestres o criar ganado. Estas operaciones agrícolas reciben un certificado de productor orgánico. Los manipuladores orgánicos pueden comprar alimentos para revenderlos o pueden procesarlos (rebanarlos, congelarlos, secarlos, mezclarlos, licuarlos, etc.). Estas operaciones reciben un certificado de manipulador orgánico. El certificado orgánico verifica que el productor o manipulador ha cumplido con las regulaciones orgánicas y le permite vender o representar el producto como orgánico. Los certificados de productor incluyen el tipo de cultivo (por ejemplo, zanahorias, manzanas), y también pueden incluir otra información.

Otro de los aspectos que se evalúan dentro del proceso de certificación es la manera en que ésta se transmite al mercado; por ejemplo, a través de etiquetas, si puede ser anunciada la obtención de la certificación; la importancia de este último aspecto radica en el valor que la certificación aporta a la marca del producto (Vertinsky y Zhou, 2000).

El proceso para obtener la certificación consta de varios pasos, y a menudo requiere de tres a seis meses para completarse. Al solicitar la certificación, el agricultor acepta comprender las regulaciones, estar disponible para la inspección, permitir que el certificador ingrese a la finca y responder a todas las preguntas del certificador. El certificador lee la solicitud, asigna un inspector, revisa el informe de inspección y toma la decisión de certificación.

Un campo es elegible para la certificación orgánica si no se han aplicado materiales prohibidos durante un periodo de 36 meses. Por ejemplo, si un huerto de manzanas fue rociado por última vez con un fungicida sintético el 1 de agosto de 2010, entonces un cultivo cosechado el 1 de septiembre de 2013 puede venderse como orgánico, pero sólo si tiene un certificado que verifique el estado orgánico (Coleman, 2012). Un certificado orgánico se expide a la operación si se determina que cumple con las normas del programa nacional orgánico (u otras

normas y leyes aplicables). Al expedirse el certificado, la operación puede empezar a vender su producto como orgánico, identificando la agencia certificadora en su etiqueta. Cada operación se inspecciona cada año para renovar la certificación (Baier, 2006).

Es importante reconocer que la certificación orgánica aborda el proceso involucrado en la producción y manipulación de un producto. La certificación orgánica es una declaración del proceso, no una declaración de producto (Coleman, 2012).

GESTIÓN DE LA SEGURIDAD ALIMENTARIA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ORGÁNICA

En la actualidad, cada vez son más los consumidores que desean que sus alimentos sean sanos y seguros. Por tal motivo, el productor tiene la responsabilidad de generar los alimentos con altos niveles de calidad e inocuidad. Un alimento inocuo es aquel que está libre de cualquier contaminante o peligro de contaminación que pueda afectar la salud del consumidor.

Los peligros de contaminación en los alimentos se agrupan en físicos, químicos y biológicos; y son definidos por Mortimore y Wallace (2018) como cualquier factor que pueda estar presente en un producto y pueda producir un daño al consumidor. Según el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (Senasica), durante el proceso de producción agrícola, los vegetales interactúan con una serie de sustancias y superficies de contacto donde adquieren contaminantes de tipo físico, químico y biológico que pueden representar un riesgo a la salud de quien los consume (Sagarpa / Senasica, 2018).

Durante la producción de estos alimentos, es necesario identificar las fuentes potenciales de contaminación presentes en la unidad productiva para aplicar las medidas pertinentes de prevención y control, y con esto asegurar la inocuidad del producto que será enviado al mercado para su consumo. Estas acciones tienen carácter preventivo y son conocidas como buenas prácticas agrícolas (BPA), y se recomienda su aplicación tanto en los sistemas de agricultura convencional como en los sistemas de agricultura orgánica.

Las BPA son definidas por la Ley Federal de Sanidad Vegetal como el conjunto de medidas higiénico-sanitarias mínimas que se realizan en el sitio de producción primaria de vegetales para asegurar que se minimiza la posibilidad de contaminación física, química y microbiológica de un vegetal o producto fresco (DOF, 2011). Dentro de los sistemas de aseguramiento de la inocuidad, las BPA incluyen una serie de actividades y procedimientos encaminados a reducir el riesgo de contaminación de los alimentos y son una herramienta importante en la obtención de productos inocuos.

La agricultura orgánica promueve el uso saludable del agua, el suelo y el aire, y minimiza todas las formas de contaminación que pueden resultar de la producción agrícola (Hopkins *et al.*, 2003). Sin embargo, para que la producción orgánica garantice la inocuidad de sus productos, se hace necesaria además la aplicación de las BPA durante todo el ciclo productivo, desde la siembra hasta su recolección. Según Siller-Cepeda *et al.* (2002), las BPA se inician desde la selección del terreno y sus alrededores, la higiene y sanidad del trabajador y las instalaciones, la calidad del agua, acciones de capacitación, entre otras, como se describe a continuación:

Selección del terreno. Se recomienda contar con la información del uso previo de tierra y de los predios colindantes con el fin de evitar que el uso del suelo en ciclos anteriores constituya un riesgo de contaminación para los vegetales. Es recomendable realizar un análisis e identificación de los peligros para aplicar las acciones preventivas o correctivas.

Higiene. Son todas aquellas medidas necesarias de lavado y desinfección con el objetivo de mantener limpias las áreas productivas y las superficies de contacto con los alimentos, incluyendo las manos de los trabajadores (figura 9). Estas medidas tienen la finalidad de evitar que los microorganismos patógenos encuentren las condiciones propicias para su reproducción.

FIGURA 9



Estación de lavado de manos en la empresa Orgánicos del Cabo, San José del Cabo, Baja California Sur.

Fuente:

Sanidad del trabajador y las instalaciones. Las reglas básicas de higiene personal y el reglamento de la empresa, con énfasis en los puntos principales, deberán ser leídos, entendidos y firmados por todos los empleados al iniciar cualquier trabajo (Siller-Cepeda *et al.*, 2002).

Calidad del agua. Por su naturaleza fisicoquímica, el agua es un excelente medio para la dispersión de contaminantes, toda vez que puede acarrear microorganismos, sustancias químicas y materiales extraños al área de cultivo. El agua empleada para la higiene de los trabajadores e instalaciones debe ser potable, libre de microorganismos patógenos, según las especificaciones de la NOM-127-SSA1-1994. Se debe asegurar que el agua utilizada para riego agrícola y aplicaciones foliares esté libre de peligros microbiológicos como *Escherichia coli*, coliformes, parásitos y otros microorganismos patógenos.

Instalaciones. Las BPA requieren de instalaciones básicas para facilitar su correcta aplicación. Se deben colocar barreras de protección que impidan el ingreso de animales del exterior y personas ajenas a la unidad de producción (figura 10).

FIGURA 10



Cerco perimetral en campo de producción de albahaca orgánica en el Pescadero, BCS.

Fuente: Alejandra Nieto Garibay.

Las estaciones sanitarias tienen como objetivo evitar defecar al aire libre, además de ser un lugar para el lavado de manos (figura 11). Éstas deben construirse con materiales que faciliten su lavado y desinfección. Asimismo, las estaciones sanitarias deben cumplir con lo siguiente (Sagarpa / Senasica, 2018): estar provistas de inodoro, contar con papel higiénico, jabón líquido, agua potable, toallas de papel para secado de manos y bote para basura; colocar señales que indiquen el lavado de manos después de usar el sanitario; conservarse limpios, secos y desinfectados; contener solución desinfectante para las manos; equipo de limpieza y desinfección de uso exclusivo, y no presentar fugas.

FIGURA 11



Sanitarios con estación de lavado de manos, en campo de producción de albahaca orgánica en el Pescadero, BCS.
Fuente: Alejandra Nieto Garibay.

Abonos orgánicos. De acuerdo con Sagarpa y Senasica (2018), los abonos utilizados en la producción de cultivos orgánicos deben presentar ausencia de *Salmonella* spp., *E. coli* O157:H7, huevecillos de parásitos, así como de residuos de plaguicidas y metales pesados al momento de su aplicación.

Los abonos orgánicos deben ser tratados antes de aplicarse para controlar la presencia de contaminantes de origen químico y biológico. Una vez preparado el abono, debe evitarse su recontaminación, cubriéndolo con plástico; evitar mojarlo con agua contaminada, protegerlo contra el ingreso de animales y evitar el uso de contenedores sucios para su traslado.

Manejo de fauna. Se deben aplicar medidas para prevenir o evitar la presencia de animales dentro del área productiva. La importancia sanitaria de los animales domésticos y silvestres presentes en el sitio de producción radica en el potencial que tienen para actuar como vehículos activos o pasivos de microorganismos patógenos, y aportar materia extraña (Fernández-Escartín, 2008). Se debe evitar su interacción con fuentes de agua, espacios productivos de cosecha, empacado, almacenamiento de

productos y superficies que entren en contacto directo o indirecto con el producto (Sagarpa / Senasica, 2018).

Capacitación. Todos los trabajadores deben recibir capacitación constante para desarrollar y actualizar conocimientos sobre las medidas higiénicas necesarias durante la elaboración y manipulación de los alimentos (figura 12). Se debe capacitar a empleados permanentes y eventuales, al inicio, durante la temporada, cada vez que ingrese personal y cuando se realicen cambios en los procedimientos.

FIGURA 12



Capacitación en Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) a productores de albahaca orgánica, en el Ejido El Pescadero, Baja California Sur.

Fuente: Alejandra Nieto Garibay.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La agricultura orgánica, por sus principios, busca la salud ambiental, de los productos y del ser humano. El uso de insumos inocuos favorece la preservación ambiental y evita el consumo de productos contaminados. En Baja California Sur se entienden cada vez más las ventajas que este tipo de agricultura tiene y cómo debe practicarse. Aunque el número de cultivos que se siembra de forma orgánica es la tercera parte de los convencionales,

los números demuestran que la agricultura orgánica va en aumento, lo que denota el interés por practicarla, por lo que el aumento de diversidad de cultivos orgánicos representa una oportunidad para BCS.

Por otro lado, de acuerdo con los datos de la agricultura convencional, la agricultura orgánica se vuelve una oportunidad para la práctica de ésta en la gran superficie de la agricultura convencional. Si la extensión de los cultivos orgánicos crece más en número que en superficie, la conversión de la agricultura convencional a la orgánica aumenta en beneficios, lo que favorece el ambiente y la oportunidad del consumo de alimentos sanos.

Un aliciente socioeconómico para incrementar la práctica de la agricultura orgánica es que su valor de producción se ha incrementado más que el de la convencional, lo que también representa un punto a favor del ambiente, en el sentido de que en una menor superficie es posible obtener un valor mayor de la producción sin tener que deforestar más terreno para la agricultura convencional.

Otro aliciente es el precio medio rural que se paga por los productos orgánicos, que, como se vio en el capítulo, es mayor que el convencional. La certificación es también uno de los procesos que se entiende cada vez más en la agricultura orgánica y, junto con ella, la gestión en la inocuidad de los sistemas orgánicos, lo cual es muy positivo para lograr los principios de esta agricultura.

Al reconocer cada vez más los fundamentos, procedimientos y acciones que conlleva una producción orgánica, por parte de los productores y consumidores, además de las condiciones insulares en las que se encuentra Baja California Sur y que favorecen la lejanía para plagas y enfermedades agrícolas, el estado se vuelve un ejemplo de la producción sustentable de alimentos, con posibilidades crecientes en todos los campos que coadyuvan a su desarrollo, investigación, tecnología y recursos naturales.

REFERENCIAS

- ALTIERI, M., y Nicholls, C. I. (2000). *Agroecología. Teoría y práctica para una agricultura sustentable*. México: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente / Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe.

- ARIAS HERNÁNDEZ, A. (2015). *Productos orgánicos en México*. México: Centros de Estudio para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria.
- BAIER, A. (2006). *El proceso de la certificación orgánica. Serie mercadotecnia, negocios y manejo de riesgos*. Arkansas: National Center for Appropriate Technology.
- BELTRÁN-MORALES, F. A., Nieto-Garibay, A., Murillo-Chollet, J. S. A., Ruiz-Espinoza, H., Troyo-Dieguez, E., Alcalá-Jáuregui, J. A., y Murillo-Amador, B. (2019). “Contenido inorgánico de nitrógeno, fósforo y potasio de abonos de origen natural para su uso en agricultura orgánica”, *Terra Latinoamericana*, 37(4), 371-378.
- BUI, H. T. M., y Nguyen, H. T. T. (2021). “Factors influencing farmers’ decision to convert to organic tea cultivation in the mountainous areas of northern Vietnam”, *Organic Agriculture*, 11(1), 51-61.
- CABRERA, V. R. P., Morán, M. J. J., Mora, V. B. J., Molina, T. H. M., Moncayo, C.O.F., Díaz, O. E., Meza, B. G. A., y Cabrera, V. C. A. (2016). “Evaluación de dos insecticidas naturales y un químico en el control de plagas en el cultivo de frijol en el litoral ecuatoriano”, *IDESIA*, 34(5), 27-35.
- CEDRSSA (2020). *Precios al productor agropecuario: situación actual y perspectivas*. México: Centros de Estudio para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria.
- Coleman, P. (2012). *Guide for organic crop producers*. Fayetteville, AK: National Center for Appropriate Technology. USDA Organic.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2011). “Decreto por el que se reforma el artículo 77 de la Ley Federal de Sanidad Vegetal”. México: FAO.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2006). “Ley de productos orgánicos. Nueva ley”. México: DOF 07-02-2006.
- DURAM, L. (2000). “Agents’ perceptions of structure: how Illinois organic farmers view political, economic, social, and ecological factors”, *Agriculture and Human Values*, 17(1), 35-48.
- FAO (2017). *The future of food and agriculture: trends and challenges*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

- FAO (2013). *El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas*. Asunción, Paraguay: FAO / Gobernación Departamento Central, Agricultura para el Desarrollo.
- FERNÁNDEZ-ESCArtÍN, E. (2008). *Microbiología e inocuidad de los alimentos*. Querétaro, Qro.: Universidad Autónoma de Querétaro.
- GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L., Valdez-Cepeda, R. D., Rodríguez-Ortiz, J. C., Rueda-Puente, E. O., Servín-Villegas, R., y Beltrán-Morales, F. A. (2006). "Agricultura sustentable en Baja California Sur: indicadores de calidad en agricultura orgánica", en L. F. Beltrán-Morales, J. Urciaga-García y A. Ortega Rubio, *Desarrollo sustentable. ¿Mito o realidad?* La Paz, BCS: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, 241-266.
- HOPKINS, R., Andersen, M., y van Lidth de Jeude, M. (2003). (2003). *Memoria del taller "Agricultura orgánica: una herramienta para el desarrollo rural sostenible y reducción de la pobreza"*. Turrialba, Costa Rica: Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola/ Unidad Regional de Asistencia Técnica / Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza / Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- IFOAM (2014). *The IFOAM norms for organic production and processing*. Bonn: International Federation of Organic Agriculture Movements.
- IFOAM (2011). *Normas Básicas del IFOAM*. Bonn: International Federation of Organic Agriculture Movements.
- KUEPPER, G. (2002). *La certificación para granjas orgánicas y el programa orgánico nacional*. Fayetteville, AR: National Center for Appropriate Technology, USDA.
- LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. D., Gutiérrez P. G., y Berumen, P. S. (2000). "Labranza de conservación usando coberturas de abono orgánico en alfalfa", *Terra Latinoamericana*, 18(2), 161-171.
- LÓPEZ-PÉREZ, M. E., del Rincón-Castro, M. C., Muñoz-Torres, C., Ruiz-Aguilar, G. M. L., Solís-Valdez, S., y Zanor, G. A. (2017). "Evaluación de la contaminación por elementos traza en suelos agrícolas del suroeste de Guanajuato, México", *Acta Universitaria*, 27(6), 10-21.

- MAYA, Y. (2011). “Diagnóstico ambiental de suelos erosionados”, *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), 169-179.
- MORTIMORE, S., y Wallace, C. (2018). *HACCP. Enfoque práctico*. Zaragoza, España: Acribia.
- MURILLO-AMADOR, B., Morales-Prado, L. E., Troyo-Diéguez, E., Córdoba-Matson, M. V., Hernández-Montiel, L.G., Rueda-Puente, E. O., y Nieto-Garibay, A. (2015). “Changing environmental conditions and applying organic fertilizers in *Origanum vulgare* L”, *Frontiers in Plant Sciences*, 6, 549.
- PEIYUE, L., Karunanidhi, D., Subramani, T., y Srinivasamoorthy (2021). “Sources and consequences of groundwater contamination”, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 80, 1-10.
- REGANOLD, J. P., y J. M. Wachter (2016). “Organic agriculture in the twenty-first century”, *Nature Plants*, 2, 15221.
- ROUSSOS, P. A., Gasparatos, D., Kechrologou, K., Katsenos, P., y Bouchagier, P. (2017). “Impact of organic fertilization on soil properties, plant physiology and yield in two newly planted olive (*Olea europaea* L.) cultivars under Mediterranean conditions”, *Science Horticulture*, 220, 11-19.
- SAGARPA / SENASICA (2018). “Requisitos generales para certificación y reconocimiento de sistemas de reducción de riesgos de contaminación (SRRC), buen uso y manejo de plaguicidas (BUMP) o buenas prácticas agrícolas en la actividad de cosecha (BPCo) durante la producción primaria de vegetales”. México: Sagarpa / Senasica.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2012). “Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental”. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap0_docs_previos.pdf#p=382.
- SIACON (2018). México: Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. <https://www.gob.mx/siap/prensa/sistema-de-informacion-agroalimentaria-de-consulta-siacon>.
- SIAP (2020). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.

- SILLER-CEPEDA, J. H., Báez Sañudo, M. A., Sañudo Barajas, A., y Báez Sañudo, R. (2002). *Manual de buenas prácticas agrícolas, segunda edición. Guía para el agricultor*. México: Sagarpa / Senasica.
- STOLZE, M., Piorr, A., Häring, A. M., y Dabbert, S. (2000). *Environmental impacts of organic farming in Europe*. Stuttgart-Hohenheim: Universität Hohenheim.
- VERTINSKY, I., y Zhou, D. (2000). "Product and process certification systems, regulations, and international marketing strategies", *International Marketing Review*, 17(3), 231-253.

SECCIÓN II
Alimentación

CAPÍTULO 11
GESTIÓN DE LA INOCUIDAD
AGROALIMENTARIA
FRUTAS Y HORTALIZAS

IRENE ILIANA RAMÍREZ BUSTOS
IRASEMA VARGAS-ARISPURO
EMMANUEL AISPURU HERNÁNDEZ
CARLOS GABRIEL BORBÓN MORALES
MIGUEL ÁNGEL MARTÍNEZ-TÉLLEZ¹

RESUMEN

La inocuidad es una propiedad intrínseca que debe tener un alimento para no causar daño al ser consumido. Décadas atrás, este término se manejaba como “higiene de los alimentos”. El concepto no pierde su vigencia, pues siempre se requiere de la aplicación de medidas higiénicas para obtener y mantener alimentos inocuos. La salud humana adquiere cada vez mayor importancia en una sociedad, por lo que se requiere de una o varias entidades regulatorias para ejercer una autoridad. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), la competencia de la entidad regulatoria depende mucho de su capacidad para supervisar la capacidad de producción, actualización y comercio del sector productivo. En ese sentido, se requiere mantener una cobertura suficiente respecto a calidad, como en cantidad, a fin de mantener un control que resulte efectivo para los medios de producción. Sobre todo, cuando comercian sus productos con mercados formales e internacionales. El presente documento pretende establecer un sistema de gestión de la inocuidad, basando su desarrollo en la identificación y control de los peligros de contaminación

¹ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46, Col. La Victoria, 83304, Hermosillo, Sonora. Autor de correspondencia: norawa@ciad.mx.

y prácticas adecuadas en los ambientes agrícolas y de manufactura, poniendo en primer plano el conocimiento de los diferentes riesgos de contaminación que se pueden presentar en la cadena agroalimentaria, así como la normativa y certificaciones que respaldan los sistemas de gestión de la inocuidad.

PALABRAS CLAVE: gestión de la inocuidad, inocuidad agroalimentaria, manejo de alimentos, seguridad alimentaria.

INTRODUCCIÓN

El mundo está experimentando un crecimiento urbano sin precedentes; hoy en día, más de la mitad de la población mundial es urbana, y para 2050 se prevé que vivirán en las zonas urbanas 2 500 millones de personas más (FAO, 2019a). México sigue estas tendencias globales, con 78% de la población viviendo en ciudades; esta situación trae consigo nuevas necesidades en materia de seguridad alimentaria, como las de adoptar medidas que promuevan el acceso igualitario de alimentos suficientes, inocuos, nutritivos y adecuados. La inocuidad alimentaria se define como una subdisciplina de las ciencias de la salud que hace referencia a la gestión sanitaria oportuna y libre de peligros de los insumos comestibles que llegan a la población (Shuren y Califf, 2016; Angelos *et al.*, 2017), es un elemento infraestructural crítico y necesario para el fortalecimiento de la seguridad alimentaria y la salud pública (FAO, 2001), pues cualquier incidente adverso relativo a la inocuidad de los alimentos puede afectar negativamente el comercio y la economía a escala mundial (FAO, 2019b).

En este sentido, durante los últimos años autoridades sanitarias de diversos países han reforzado el sistema de vigilancia para detectar oportunamente contaminantes biológicos, químicos y físicos en alimentos (Senasica, 2010). Un ejemplo de esto es la “Ley de modernización de la inocuidad de los alimentos” (FSMA, por sus siglas en inglés), que pretende que los instrumentos regulatorios de la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) de Estados Unidos actúen de manera preventiva y no reactiva (Senasica, 2019). La adecuada estructuración de los sistemas de gestión sanitaria y de higiene de alimentos es un entramado complejo que involucra aspectos relativos a políticas públicas, capacidad de cumplimiento de lineamientos internacionales, sistemas de monitoreo, vigilancia epidemiológica, y gestión preventiva y oportuna ante riesgos emergentes (Garzón, 2009; Antoine-Moussiaux *et al.*, 2017). Por ello, es importante establecer un sistema de aseguramiento de la inocuidad, basando su desarrollo en la investigación de la identificación de los peligros de contaminación y prácticas adecuadas en los ambientes agrícolas y de manufactura (Martínez-Martínez *et al.*, 2008). Esto pone en primer plano el conocimiento de los diferentes riesgos de contaminación que se pueden presentar en la cadena agroalimentaria, así como la normativa y certificaciones que respaldan los sistemas de gestión de la inocuidad.

PELIGROS DE CONTAMINACIÓN EN ALIMENTOS

En el tema de inocuidad alimentaria, normalmente se define un peligro como un agente de naturaleza biológica, física o química con potencial para causar daño a la salud del consumidor, mientras que un riesgo es la probabilidad de ocurrencia de un peligro durante las actividades propias de la producción, empaque, transporte y distribución del alimento. En la actualidad, la comercialización de productos horto-frutícolas está dirigida a los que sean manejados bajo programas de buenas prácticas agrícolas (BPA) (Martínez-Téllez *et al.*, 2007) o conservados por tecnologías de mínimo procesamiento y aceptable inocuidad (Díaz y Vernon, 1999). Esto implica un reto importante para la producción primaria de vegetales, ya que, en los métodos convencionales de producción, la preocupación principal era la sanidad fitosanitaria y la calidad exigida por el mercado, sin tomar en cuenta que sus procesos de producción representaban un riesgo de contaminación para el ambiente, la salud del consumidor y el trabajador, lo cual asimismo pone en riesgo la salud de los consumidores al ocasionar enfermedades transmitidas por alimentos (ETA), que son consideradas como un problema de salud pública (Sotelo y Sánchez, 2019); debido a la carga de morbilidad y mortalidad que representan (De Plata, 2003), pueden producir desde leves cuadros diarreicos, septicemia, choques anafilácticos e incluso la muerte del consumidor (Clark, 2012). Un factor de riesgo es el agua contaminada con heces humanas o animales, usada para regar los cultivos, la cual puede ser portadora de microorganismos, que incluyen cepas patógenas de parásitos o bacterias (Salazar y González, 1999), frecuentemente conocidos como peligros biológicos (FAO, 1998), los cuales pueden transferirse a los alimentos por contacto directo con el personal que los manipula o a través de las superficies de contacto con el alimento (Codex Alimentarius, 2003) (figura 1); siendo las bacterias los principales agentes patógenos (Sánchez, 2008), como *Escherichia coli* patogénica, *Clostridium botulinum*, *C. perfringens*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* tipo emético, *Vibrio cholerae*, *V. parahaemolyticus*, *Yersinia enterocolitica*, *Shigella* sp., *Salmonella* sp. y *Listeria monocytogenes*, entre otras (Kopper *et al.*, 2009).

FIGURA 1



Superficies de contacto, empackadora de Higo (*Ficus carica* L.),
mesas, charolas, basculas, cajas y manos de personal.
Fuente: Miguel Ángel Martínez-Téllez.

La preocupación mundial por el uso de productos químicos utilizados en la agricultura ha ido en aumento en los últimos años (Romano *et al.*, 2019), y el caso de México no es la excepción, ya que destina el 85% de los plaguicidas producidos al sector agrícola (Altamirano *et al.*, 2004), lo que implica que cualquier persona tiene riesgo de entrar en contacto con residuos químicos durante el almacenamiento y uso incorrecto de desinfectantes, fitohormonas, antibióticos, plaguicidas y fertilizantes, lo cual representa un riesgo químico que es considerado como la probabilidad de que el alimento se contamine con cualquier compuesto o elemento químico durante cualquier etapa de la cadena productiva (Osuna *et al.*, 2011). Los peligros físicos son materiales extraños al alimento, como astillas de vidrio o de madera, grapas, piedras, trozos de alambre, tornillos o tuercas, entre otros, que pueden llegar al producto, llevados por los trabajadores o ser parte de algún equipo o material de empaque (Osuna *et al.*, 2011), éstos pueden ocasionar daños a la salud del consumidor al momento de ser consumidos. Debido a esto, es indispensable que las empresas conozcan el alcance de los sistemas de aseguramiento de la inocuidad y la forma de integrarlos a sus sistemas de producción

(Martínez-Martínez *et al.*, 2013), adquirir nuevas tecnologías, capacitar el personal y aplicar políticas y procedimientos que impidan la contaminación (Cruz *et al.*, 2019).

Bioterrorismo

La inocuidad de los alimentos que se consumen en Estados Unidos es responsabilidad de la FDA, la cual controla la seguridad de los alimentos incluyendo la aplicación de la Ley de Bioterrorismo publicada en 2002, por medio del Centro para la Seguridad Alimentaria y Nutrición Aplicada CFSAN (Artecona y Sténeri, 2008). Esta ley consiste de un gran número de disposiciones legales con el propósito de mejorar la habilidad de prevención y respuesta a un ataque terrorista con agentes biológicos (García, 2003). El término *bioterrorismo* se define como un riesgo de contaminación mediante una deliberada liberación de agentes infecciosos, con el único fin de enfermar a un sector de la población; la diferencia básica en comparación con la seguridad alimentaria es que la primera se ocupa de la protección frente a la contaminación o adulteración intencional de los productos alimenticios, y la segunda se centra en la contaminación no intencionada (FSSC, 2019). Un aspecto más que los sistemas de gestión de inocuidad alimentaria han tenido que tomar en cuenta para generar estrategias que prevengan y controlen este tipo de riesgo de contaminación.

NORMATIVA INTERNACIONAL

ISO es la Organización Internacional de Estandarización, estructurada por los diferentes organismos de estandarización nacionales e internacionales (Herrera y Schmalbach, 2010), un ejemplo de esto es la aplicación de un sistema integrado de gestión de calidad e inocuidad basado en las normas ISO 9001:2008 e ISO 22000:2005, mediante la cual se logran establecer las condiciones operativas necesarias para cumplir con las condiciones exigidas por los clientes (Monterroza *et al.*, 2018). En esta norma se abordan los requisitos para un sistema de gestión de inocuidad alimentaria que se pueden aplicar a una organización que necesite

demostrar su capacidad para controlar los peligros que en esta materia se presenten (Incotec, 2018). Tomando en cuenta lo anterior, los elementos más importantes para garantizar la inocuidad de los alimentos en el transcurso de la cadena alimentaria son comunicación interactiva, gestión del sistema, programas de prerrequisitos y principios APPCC, también conocido como HACCP, del inglés Hazard analysis and critical control points (Paz *et al.*, 2017). La función de la acción comunicativa dentro de los procesos de aplicación de la norma ISO 22000 se nutre, estructura y complementa de la norma ISO 9001 y requiere de enlazarse al sistema HACCP (Bancomext, 2019); el enfoque HACCP se usa para identificar y evaluar riesgos (incluyendo su posible ocurrencia y gravedad), así como para controlar peligros en la producción de alimentos (Chen *et al.*, 2019). En 2000, se estableció la Global Food Safety Initiative (GFSI), en

CUADRO 1
PRINCIPALES ESQUEMAS DE CERTIFICACIÓN EN EL MUNDO

País donde se originó	Empresa	Cadena alimentaria
Canadá	Global Red Meat Standard	Inocuidad de carnes rojas de animales
	CanadaGap Scheme	Inocuidad de frutas y verduras frescas
	IFS PACsecure	Empaque de alimentos
Estados Unidos	FSSC 22000	Inocuidad de alimentos y empaque
	Global Aquaculture Alliance Seafood	Productos del mar
	PrimusGFS Standard	Agricultura
	SQF Code	Calidad e Inocuidad de procesamiento de alimentos, agricultura y empaque, entre otros
Europa	GLOBALG.A.P. Integrated Farm Assurance	Inocuidad en prácticas de agricultura
Reino Unido	IFS International Featured Standards	Inocuidad de procesamiento de alimentos
	BRC Global Standard for Food Safety	Procesamiento de alimentos y empaque

Elaboración propia.

respuesta a la petición de distribuidores internacionales, con el objetivo de asegurar en todo el mundo la confianza de entregar alimentos seguros a los consumidores; conformada por cuatro normas Global Standard for Food Safety (BRC), International Food Standard (IFS), Dutch HACCP y Safe Quality Food Programme (SQF); para 2009, la Fundación Food Safety System Certification diseñó FSSC 22000, que se especializa en fabricantes de productos de origen animal y vegetal, entre otros, con el objetivo de asegurar la inocuidad de los productos que se suministran en el mundo por la aplicación de HACCP, TACCP y VACCP (FSSC, 2019)

Para 2020, los principales esquemas de certificación (cuadro 1) en la cadena alimentaria con diferentes niveles de aplicación en normas alimentarias han tenido presencia principalmente en Estados Unidos, Canadá y Europa, donde se regula la producción primaria, el empaque y la distribución.

En México, debido a que los mercados de exportación de vegetales son principalmente Estados Unidos y Europa, las certificaciones más solicitadas por las empresas importadoras son GlobalG.A.P. y Primus GFS.

NORMATIVA NACIONAL

En México, La Ley Federal sobre Metrología y Normalización convoca a los sectores públicos, privados, científicos y de consumidores a participar en la elaboración y observancia de normas oficiales mexicanas y normas mexicanas (Intedya, 2015). En este contexto, para México es obligatorio garantizar las condiciones ambientales adecuadas para la recepción de alimentos, el almacenamiento, manejo de sustancias, refrigeración, congelación, áreas de cocción, preparación y montaje de alimentos, servicios sanitarios, manejo de residuos y control de plagas, entre otros, con la finalidad de asegurar la inocuidad alimentaria (Ibarra y Jiménez, 2018). Un ejemplo de esto son la NOM-006-Conagua-1997 (figura 2), diseñada para prevenir la contaminación por materia fecal asociada a las fosas sépticas. En la producción primaria, generalmente el acceso a drenaje público es poco probable, por lo que hay que tener especial cuidado en las características que deben tener los sanitarios que se encuentran en las áreas de producción y empaque.

FIGURA 2



Baños con fosas sépticas herméticas que disminuyen los riesgos de contaminación por derrames con heces fecales, en las áreas de producción.

Fuente: Miguel Ángel Martínez-Téllez.

Asimismo, se cuenta con la NOM-004-STPS-1999 (figura 2), que norma a los sistemas de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilicen durante la producción y el procesamiento de hortalizas.

FIGURA 3



Personal en cumplimiento del reglamento de mantenimiento e higiene en la selección mecánica de naranjas.

Fuente: Miguel Ángel Martínez-Téllez.

La NOM-003-STPS-1999, la cual establece la justificación de existencia y características del área de almacenamiento de sustancias agroquímicas y fertilizantes; se deben designar áreas específicas separadas polvos de líquidos con la finalidad de evitar contaminación cruzada. En el caso de fertilizantes de origen orgánico, deben garantizar ausencia de *Salmonella* spp, *E. coli* 0157:H7, huevecillos de parásitos, así como plaguicidas y metales pesados; incluso debe aplicarse en empresas de pequeña escala que cuentan con un solo almacén para plaguicidas, fertilizantes, equipo y herramientas, designando y señalizando dentro del almacén áreas específicas para cada rubro. La NOM-026-STPS-2008 (figura 4), para la identificación y señalización de las instalaciones básicas, mediante colores y señales de seguridad e higiene; en el área de producción primaria, como en el empaque de hortalizas, se deben considerar señales de prohibición, obligación, precaución e información mediante simbologías, bandas de identificación, colores contrastantes y de seguridad; éstas deben ubicarse, de acuerdo con su aplicación, en lugares visibles para los operarios.

La normativa nacional es complementaria en la aplicación de sistemas de gestión de la inocuidad ya que proporciona un sustento legal para las acciones correctivas que minimizan los riesgos de contaminación.

FIGURA 4



Señalamientos básicos para la entrada a las instalaciones de empresas con sistema de aseguramiento de la inocuidad implementado.

Fuente: Miguel Ángel Martínez-Téllez.

La NOM-127-SSA1-1994, donde se definen los métodos para la validación de la eficacia de los tratamientos aplicados al agua. La NOM-251-SSA1-2009, que norma la elaboración de procedimientos que garanticen la higiene en el proceso y seguridad del personal al realizar las actividades correspondientes, mediante documentos, registros, reportes, programas de mantenimiento y calibración en las actividades de recepción de materias primas, envase o embalaje, producción almacenamiento y distribución, limpieza, control de plagas y capacitación de personal, entre otros.

Aunado a las normas mencionadas para obtener una certificación nacional que garantice la inocuidad durante el proceso de producción, empaque y distribución de frutas y hortalizas frescas, se deben tomar en cuenta los lineamientos generales para la operación, certificación y reconocimiento de SRRC, BUMP o BPCO, publicados por Senasica y Sagarpa.

SISTEMAS INTEGRALES DE CERTIFICACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS FRESCOS EN MÉXICO

En general, las certificaciones más solicitadas en México coinciden con la aplicación en cualquier unidad de producción agrícola durante la etapa de producción primaria, cosecha y empaque del producto; se prevé el establecimiento de medidas preventivas que eviten la contaminación del producto en actividades desarrolladas durante el manejo del agua, uso de agroquímicos, higiene de personal, equipos e infraestructura productiva, manejo de fauna doméstica y silvestre, cosecha, empaque y transporte, entre otros.

GLOBALG.A.P.

El sector minorista agrupado bajo EUREP (Euro-Retailer Produce Working Group) inició en 1997 como Eurepgap; en 2007, cambió su nombre a GlobalG.A.P.

Las normas Eurepgap favorecieron a los productores a cumplir con los criterios aceptados en Europa referente a inocuidad alimentaria, tomando en cuenta los métodos de producción sostenible, bienestar de los

trabajadores y animales, uso responsable del agua, alimentos para animales y materiales de reproducción vegetal. Esto reflejó su alcance global y se convirtió en una norma líder mundial de buenas prácticas agrícolas.

Los estándares son elaborados por comités sectoriales elegidos por el minorista y miembros productores/proveedores (GlobalG.A.P., 2013). En comparación con los demás sistemas, en el último módulo se abordan cuestiones sociales y no de seguridad alimentaria (Matthews, 2014), tomando en cuenta mercados sociales y problemas ambientales (Bain y Worosz, 2011). Por último, GlobalG.A.P., como creador de estándares privados funcionalmente especializados, puede desarrollarlos de forma dinámica y autónoma con respecto a otros públicos (Scott, 2002).

PrimusGFS®

Primus GFS es un esquema reconocido por GFSI, la Iniciativa Global de Inocuidad Alimentaria; provee cobertura total a la cadena de proveedores de producto fresco (Primus GFS, 2020), siendo un esquema de auditoría comparativo que cubre tanto los alcances de buenas prácticas agrícolas, buenas prácticas de manufactura y análisis de peligros y de puntos críticos de control, como los sistemas de gestión de seguridad alimentaria; es propiedad y está administrado por Azzule Systems (Primus Lab, 2019). Opera como un organismo certificador estadounidense que audita a la mayor cantidad de productores; en el mismo sentido, el resto del mercado lo comparten Ance A. C., Global Standards S. C., Normex de Michoacán, A. C., Verificación y Certificación PAMFA A. C., KWA BCS OKO Garantie (Primus GFS, 2020).

Sistemas de reducción de riesgos de contaminación (SRRC)

La Ley Federal de Sanidad Vegetal modificada el 26 de julio de 2007 tiene como objetivo la aplicación, verificación y certificación de los SRRC en la producción y empaque de vegetales (Herbert *et al.*, 2010). Se definen como las medidas y procedimientos establecidos por la Ley de Sanidad Vegetal, en normas oficiales mexicanas y demás disposiciones

legales aplicables que garantizan el proceso de producción primaria reduciendo la contaminación física, química y microbiológica.

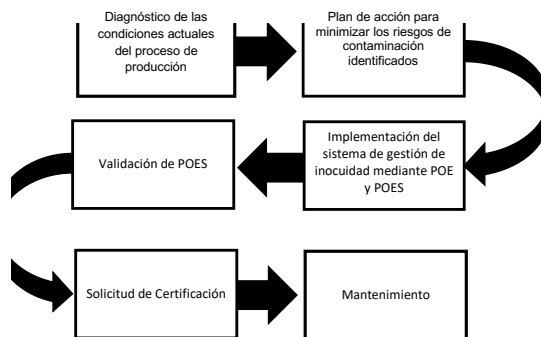
La obtención de algún tipo de certificación no asegura por sí sola el éxito de la organización, debido a que los protocolos exigen una adecuada gestión del proceso, incluyendo evaluaciones periódicas (Gutiérrez *et al.*, 2009). En gran medida, la presencia de sistemas resilientes enfocados a la gestión sanitaria de los alimentos se relaciona con la ejecución y aplicación de estructuras organizacionales robustas y eficientes (Qekwana, 2017).

IMPLEMENTACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE CERTIFICACIÓN

El punto de partida para obtener cualquier certificación es realizar un diagnóstico para determinar las condiciones en que se desarrolla un ciclo de producción, ya sean frutas o vegetales. Se entiende como diagnóstico el propósito de identificar el estado de la organización frente a los requisitos establecidos, identificando la brecha entre la situación actual y la deseada (Bernal, 2015).

Mediante un diagrama de flujo, las actividades que se realizan deben describirse y observarse para identificar los posibles riesgos de contaminación; en general, podemos describir seis fases para la aplicación (figura 5): diagnóstico, plan de acción, desarrollo, validación del sistema, solicitud de la certificación y mantenimiento.

FIGURA 5



Fases para la aplicación de sistemas de reducción de riesgos de contaminación como plan de gestión de la inocuidad agroalimentaria.

Fuente: Miguel Ángel Martínez-Téllez.

Posteriormente, se elabora un plan de acción que minimice los riesgos de contaminación y se estructura en procedimientos operativos estándar (POE) y procedimientos operativos estándar relacionados con sanidad (POES) para cada una de las fases de aplicación. Los POE son instrucciones escritas de actividades o procesos aplicables a productos, insumos e infraestructura, que se realizan con la finalidad de mantener la inocuidad en la cadena alimentaria (ANMAT, 2010); se pueden clasificar en administrativos y operativos. Los POES se definen como los procedimientos estandarizados de desinfección para asegurar que la higiene se lleva a cabo de manera eficaz y adecuada. Martínez-Martínez (2013) también los define como las acciones que evitan la contaminación cruzada en cada área, ya sea por utensilios, empleados o en el traslado de equipo de un área a otra; se aplican a la estandarización de los procesos que garantizan la calidad del agua, higiene del personal, limpieza y desinfección de herramientas y equipo, manejo de residuos, productos químicos y control de plagas.

En la actualidad, el uso de POE y POES es fundamental dentro de los sistemas de gestión de la calidad alimentaria; uno de los principales objetivos es la estandarización de métodos y procedimientos con la finalidad de prevenir errores durante la ejecución de las tareas específicas (Ortiz, 2011). Mediante éstos se generan evidencias documentales en bitácoras y registros, suficientes y pertinentes, que se mantienen en resguardo al menos un ciclo anterior, con la finalidad de demostrar la aplicación y eficacia. Cabe mencionar la importancia de incluir dentro de éstos el tema de trazabilidad o rastreabilidad, que se define por Fernández (2002) como la capacidad de productores, industriales, comerciantes, consumidores y poderes públicos de poderle seguir la pista a un determinado producto a lo largo de toda o parte de su vida útil; de este modo, la información generada depende directamente del flujo físico de la mercancía (Bosona y Gebresenbet, 2013). El comercio internacional de alimentos cada día regula más, con la finalidad de dar seguimiento al rastro de los productos en todas sus etapas (Martínez, 2019), lo que convierte en obligatorio implementar un procedimiento que estructure el sistema de trazabilidad.

Dentro de las empresas pequeñas y medianas con conocimiento básico, experiencia y recursos limitados, la mejor manera de aplicar los procedimientos es mediante la capacitación (Slorach, 2002). La persona

responsable de supervisar la aplicación y vigilancia en las actividades que se determinen en los POE y POES debe dar seguimiento durante el ciclo de producción, garantizando que los empleados desarrollen habilidades para aplicar y realizar registros e identificar los peligros de contaminación en los ambientes agrícolas. En general, se les recomienda temas de capacitación, como prácticas de seguridad e higiene, preparación y monitoreo de sustancias desinfectantes, limpieza y desinfección de maquinaria y manejo de agua. Los aplicadores de plaguicidas y fertilizantes deben recibir capacitación que garantice el buen uso y manejo de agroquímicos, donde deben desarrollar la habilidad para realizar la calibración del equipo de aspersión y correcta aplicación y almacenamiento de agroquímicos. El personal dedicado a las actividades de cosecha debe ser capacitado en buenas prácticas agrícolas de cosecha y empaque, transporte e identificación de los principales síntomas de enfermedades infectocontagiosas.

Cualquier alimento que sea destinado para venta debe estar sujeto a una validación a lo largo del proceso productivo (Tanus, 2014), mediante la comprobación de los procedimientos y las medidas de control (Lorenzo, 2011); posteriormente se solicita la certificación que normalmente depende del mercado al que va dirigido el producto y de forma voluntaria pueden aplicar la normativa nacional mediante sistemas de reducción de riesgos de contaminación.

Para el mantenimiento del sistema de gestión de inocuidad, se deben validar periódicamente los POE y POES, al menos una vez durante cada ciclo de producción, para garantizar su ejecución y permanencia.

CONCLUSIÓN

La importancia de una adecuada gestión de la inocuidad alimentaria radica en fomentar la cooperación entre las empresas productoras, emparadoras, transportadoras y distribuidoras de alimentos y los gobiernos, mediante un esquema de gestión incluyente, con independencia del tipo, tamaño y producto, diseñado y aplicado de acuerdo con las particularidades de cada uno de los procesos necesarios para hacer llegar al consumidor productos inocuos, sin que éstos hayan representado un riesgo para la salud el trabajador y el ambiente.

REFERENCIAS

- ALTAMIRANO, J. E., Franco, R., y Miltre, M. B. (2004). “Modelo epidemiológico para el diagnóstico de intoxicación aguda por plaguicidas”, *Revista de Toxicología*, 21(2-3), 98-102.
- ANGELOS, J. A., Arens, A. L., Johnson, H. A., Cadriel, J. L., y Osburn, B. I. (2017). “One Health in food safety and security education: subject matter outline for a curricular framework”, *One Health*, 3, 56-65.
- ANMAT (Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica) (2019). “Portafolio educativo en temas clave en control de la inocuidad de los alimentos”. Argentina: Anmat. http://www.anmat.gov.ar/portafolio_educativo/pdf/cap6.pdf.
- ANTOINE-MOUSSIAUX, N., Peyre, M., Bonnet, P., Bebay, C., Bengoumi, M., y Tripodi, A. (2017). “The value chain approach in one health: conceptual framing and focus on present applications and challenges”, *Frontiers in Veterinary Science*, 4, 1-7.
- ARTECONA, R., y Sténeri, C. (2008). “La exportación de alimentos a Estados Unidos: principales desafíos para América Latina y el Caribe y guía de acceso a la información”. Cepal. <https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5068/S0800056.pdf?sequence=1>.
- BAIN, C., Ransom, E., y Worosz, M. R. (2011). “Constructing credibility: using technoscience to legitimate strategies in agrifood governance”, *Journal of Rural Social Sciences*, 25(3), 160.
- BANCOMEXT (Banco Nacional de Comercio Exterior) (2019). “Tips de asistencia técnica Norma ISO 22000”. México: Bancomext. <http://www.portalcalidad.com>.
- BARR, D. B., Ananth, C. V., Yan, X., Lashley, S., Smulian, J. C., Ledoux, T. A., ... y Robson, M. G. (2010). “Pesticide concentrations in maternal and umbilical cord sera and their relation to birth outcomes in a population of pregnant women and newborns in New Jersey”, *Science of the total environment*, 408(4), 790-795.
- BERNAL, L. (2015). “Lineamientos para la implementación de FSSC22000-1; Sistema de Certificación en Inocuidad de Alimentos en una Organización”, *Revista Scientia Agroalimentaria*, (2) 25-31.

- BOSONA, T., y Gebresenbet, G. (2013). "Food traceability as an integral part of logistics management in food and agricultural supply chain", *Food Control*, 33(1), 32-48.
- CHEN, H., Chen, Y., Liu, S., Yang, H., Chen, C., y Chen, Y. (2019). "Establishment the critical control point methodologies of seven major food processes in the catering industry to meet the core concepts of ISO 22000: 2018 based on the Taiwanese experience", *Journal of Food Safety*, 39 (6) 1-10.
- Codex Alimentarius (2003). "Código de prácticas de higiene para las frutas y hortalizas frescas", *CAC/RCP*, 53, 26.
- CLARK, B. (2012). "263 with E. coli and Belfast Public Health Agency CYA". [http:// www.foodpoisonjournal.com/foodborne-illnessoutbreaks/263-with-e-coli-and-belfast-publichealth-agency-cya/#.WVvk88CeQw8o](http://www.foodpoisonjournal.com/foodborne-illnessoutbreaks/263-with-e-coli-and-belfast-publichealth-agency-cya/#.WVvk88CeQw8o).
- CRUZ GUTIÉRREZ, J. A., Velázquez Jiménez, P. E., y Trejo Flores, P. G. (2019). "Costos y áreas de oportunidad en la implementación de políticas de inocuidad en empresas agroindustriales", *Revista Salud y Administración*, 6(17), 39-47.
- DÍAZ-SOBAC, R., y Vernon-Carter, J. (1999). "Inocuidad microbiológica de frutas frescas y mínimamente procesadas", *CYTA-Journal of Food*, 2(3), 133-136.
- Diario oficial de la Federación (s.f.1). "Norma Oficial Mexicana NOM-003-CNA-1996. Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos." <http://cdam.unsis.edu.mx/files/Gestion%20ambiental/Otras%20disposiciones/NOM-003-CNA-1996.pdf>.
- Diario oficial de la Federación (s.f.2). "Norma Oficial Mexicana NOM-006-CNA-1997. Fosas sépticas prefabricadas. Especificaciones y métodos de prueba". <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/94214/NOM-006-CONAGUA-1997.pdf>.
- Diario oficial de la Federación (s.f.3). "Norma Oficial Mexicana NOM-003-STPS-1999. Actividades agrícolas. Uso de insumos fitosanitarios o plaguicidas e insumos de nutrición vegetal o fertilizantes. Condiciones de seguridad e higiene". <http://asinom.stps.gob.mx:8145/upload/noms/Nom-003.pdf>.

- Diario oficial de la Federación (s.f.4). “Norma Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009. Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios”. <https://www.aps.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/58d/d46/e15/58dd46e15b507007060713.pdf>.
- Diario oficial de la Federación (s.f.5). “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2016/10/nom127_modificacion_2000.pdf.
- Diario oficial de la Federación (s.f.6). “Norma Oficial Mexicana NOM-004-STPS-1999. Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilice en los centros de trabajo”. <http://www.cucba.udg.mx/sites/default/files/proteccion-civil/normatividad/NOM-004-STPS-1999.pdf>.
- Diario oficial de la Federación (s.f.7). “Norma Oficial Mexicana NOM-026-STPS-2008. Colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías”. <http://asinom.stps.gob.mx:8145/upload/noms/Nom-026.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2019a). “Objetivos de desarrollo sostenible”. <http://www.fao.org/3/ca3151es/ca3151es.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2019b). “Inocuidad de los alimentos un asunto de todos”. <http://www.fao.org/3/ca4449es/ca4449es.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2001). “Taller nacional sobre aplicación de buenas prácticas de manufactura (BPM) y sistema de análisis de peligros y puntos críticos de control (APCC)”. San José, Costa Rica: FAO. http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/comagric/codex/rla2904/pdf/aplicacol.pdf.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (1998). “Trabajo 145 de la División de Producción y Protección Vegetal”. <http://www.fao.org/3/a-be792s.pdf>.
- FERNÁNDEZ ANDRADE, R. (2002). “Trazabilidad alimentaria”, *Distribución y Consumo*, 62, 5-9.

- FSSC 22000 (Food Safety System Certification) (2019). *Certificación 22000 de sistema de la inocuidad de los alimentos*. https://www.fssc.com/wp-content/uploads/19.1217-Guidance_Food-Fraud-Mitigation_Version-5_ES.pdf
- GARCÍA WINDER, M. (2003). “Lo que el exportador agroalimentario debe conocer sobre la ley contra el bioterrorismo”. México: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. http://infoagro.net/sites/default/files/migrated_documents/attachment/infoagrobioterrorism.pdf.
- GARZÓN, T. (2009). “La inocuidad de alimentos y el comercio internacional”, *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 22(3), 330-338.
- GUTIÉRREZ GUZMÁN, N., Serra Belenguer, J. A., y Clemente Marín, G. (2009). “Identificación de factores críticos para implantar buenas prácticas agrícolas”, *Ingeniería e Investigación*, 3(29), 109-114.
- GLOBALG.A.P. (2019). “Constitución y gobierno de GlobalG.A.P.”. <https://www.globalgap.org/es/who-we-are/governance/>.
- GLOBALG.A.P. (2013). “General regulations. Part III. Certification body and accreditation rules”, 1-31.
- HAVINGA, T. (2013). “Food retailers as drivers for food safety standards”, *Nijmegen Sociology of Law Working Papers Series 2013/03*. Tetty Havinga. <https://repository.ubn.ru.nl/bitstream/handle/2066/112933/112933.pdf>.
- HERBERT RUIZ, M., Mora Flores, J. S., Damián, M., Ángel, M., y García Mata, R. (2010). “Impacto económico de la Ley Federal de Sanidad Vegetal en el mercado mexicano de limón persa”, *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(3), 321-333.
- HERRERA, T. J. F., y Schmalbach, J. C. V. (2010). *La gestión de la calidad en los servicios ISO 9001: 2008*. Eumed.net.
- INCOTEC (2019). “Norma ISO 22000”. Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. <http://www.icontec.org>.
- IBARRA, E. O., y Jiménez, A. H. (2018). “Manejo higiénico en el servicio de alimentos: Codex Alimentarius y normas oficiales mexicanas”, *UV serva*, (6) 77-83.
- INTEDYA (International Dynamic Advisors) (2015). “Norma Oficial Mexicana 251. México: Intedya. <http://www.intedya.com/internacional/92/consultoria-nom-251-mexico.html>. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3980/salud/salud.htm>

- KOPPER, G., Calderón, G., Scheneider, S., Domínguez, W., y Gutiérrez, G. (2009). “Enfermedades transmitidas por alimentos y su impacto socioeconómico. Informe técnico sobre ingeniería agrícola y alimentaria”. Roma: FAO. <https://www.fao.org/3/i0480s/i0480s.pdf>
- LORENZO, L. C. (2011). *Auditoría del sistema APPCC: cómo verificar los sistemas de gestión de inocuidad alimentaria HACCP*. Ediciones Díaz de Santos. Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.editdiazdesantos.com/www-dat/pdf/9788479788650.pdf>
- MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, T. O., Gallardo-Sandoval, A., y Osorio, C. G. (2013). “Inocuidad en el manejo de productos hortofrutícolas”, *Agroproductividad*, 6(1), 33-41.
- MARTÍNEZ, M. J. (2019). “Diagnóstico de iniciativas en instituciones público-privadas de costa rica sobre implementación de sistemas de trazabilidad del 2017-2018 para productos frescos exportados tomando la legislación internacional”, *3c Empresa: investigación y pensamiento crítico*, 8(1), 50-75.
- MARTÍNEZ-TÉLLEZ, M.A., Vargas Arispuro, I. C.; Silva Bielenberg, H.K. Espinoza Medina, I.E, Rodríguez Leyva, F., González Aguilar, G.A. (2007). “Producción y manejo poscosecha de hortalizas”, en: Gardea Bejar, A., *Buenas Prácticas en la Producción de Alimentos*, Editorial Trillas, pp.223-238.
- MATTHEWS, K. R. (ed.) (2014). *The produce contamination problem: causes and solutions*. Academic Press.
- MONTERROZA, C. A. N., Extremor, J. L. P., y Muñoz, J. E. (2018). “Guía de implementación del Sistema Integrado de Gestión ISO 9001: 2008–ISO 22000: 2005, para empresas de producción de leche entera pasteurizada y queso fresco”, *Revista Ingeniería Industrial*, 4(4), 103-108.
- ORTIZ, G. (2011). *Elaboración de procedimientos operativos estandarizados de saneamiento para el área de producción en la planta de producción Pronaca Conservas*. Quito, Ecuador: Universidad Tecnológica Equinoccial.
- OSUNA, G. J. A., Nolasco G. Y., Ortega N. L., y Sánchez L. R., (2011). “Aplicación de sistemas de reducción de riesgos de contaminación en frutales y hortalizas en Nayarit”. México: Sagarpa. <https://>

www.researchgate.net/profile/Jorge_Osuna-Garcia/publication/280319011_aplicacion_de_sistemas_de_reduccion_de_riesgos_de_contaminacion_en_frutales_y_hortalizas_en_nayarit/links/55b2800608ae9289a08589cc.pdf.

- PAZ, P. C., Añez, E. A. G., y Argote, F. E. (2007). “La comunicación organizacional en la implementación de procesos de ISO 22000 en empresas de producción de alimentos”, *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 5(1), 80-91.
- PLATA, G. V. de (2003). “La contaminación de los alimentos, un problema por resolver”, *Revista Salud UIS*, 35(1) 48-57.
- PRIMUS Lab (2020). “Primus GFS certification bodies”. <http://primus-gfs.com/certification/>.
- PRIMUS GFS (2019). “Primus GFS version 3.1”. <http://primusgfs.com/pgfs-v3-1/>.
- PRIMUS Lab (2019). “Global food safety initiative”. <http://www.primuslabs.com/modules/services/PrimusGFS.aspx>.
- QEKWANA, D., McCrindle, C., Oguttu, J., y Grace, D. (2017). “Safety risks associated with the traditional slaughter and consumption of goats in Gauteng, South Africa”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(4), 420.
- ROMANO CASAS, G., Martínez Valenzuela, C., Cuadras Berrelleza, A. A., y Ortega Martínez, L. D. (2019). “Plaguicidas, impacto en salud y medio ambiente en Sinaloa (México): implicaciones y retos en gobernanza ambiental”, *TraHs-Trayectorias Humanas Transcontinentales*, 4, 1-20.
- SALAZAR ARRIAGA, H. C., y González Sánchez, R. F. (1999). “Guía de inocuidad alimentaria y sus implicaciones para la producción y distribución del aguacate Hass mexicano”, *Revista Chapingo Serie Horticultura*, (5), 375-387.
- SÁNCHEZ MAZA, M. Á. (2008). *Manipulador de alimentos*. México: Limusa.
- SCOTT, C. (2002). “Private regulation of the public sector: a neglected facet of contemporary governance”, *Journal of Law and Society*, 29(1), 56-76.
- SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad Agroalimentaria) (2019). “Ley de modernización de la inocuidad de los alimentos

- (FSMA). Sinopsis FSMA”. México: Senasica. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/ley-de-modernizacion-de-la-inocuidad-alimentaria-fmsa-de-los-estados-unidos-acciones-senasica?idiom=es>.
- SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad Agroalimentaria) (2010). “Anexo técnico 1. Requisitos generales para el reconocimiento y certificación de sistemas de reducción de riesgos de contaminación en la producción primaria de alimentos de origen agrícola”. México: Senasica. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/lineamientos-generales-para-la-operacion-y-certificacion-de-sistemas-de-reduccion-de-riesgos-de-contaminacion>.
- SENASICA (Servicio Nacional de sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (s.f). “Anexo técnico 1. Requisitos generales para la certificación y reconocimiento de sistemas de reducción de riesgos de contaminación (SRRC), buen uso y manejo de plaguicidas (BUMP) o buenas prácticas agrícolas en la actividad de cosecha (BPCO) durante la producción primaria de vegetales”. México: Senasica. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/380338/Anexo_T_cnico_1_v.2_agosto_2018.pdf.
- SHUREN, J., y Califf, M. (2016). “Need for a national evaluation system for health technology”, *Journal of the American Medical Association*, 316(11), 1153-1154.
- SLORACH, S. (2002). “Enfoques integrados para la gestión de la inocuidad de los alimentos a lo largo de toda la cadena alimentaria”, en *Foro mundial FAO/OMS de las Autoridades de Reglamentación sobre Inocuidad de los Alimentos*, 28-30.
- SOTELO, A. B., Martínez, C., y Sánchez, S. (2019). “Características epidemiológicas y clínicas de los brotes de enfermedades transmitidas por alimentos. Paraguay 2015-2016”, *Revista de salud pública del Paraguay*, 9(1), 33-34.
- TANUS, A. (2014). *Procedimientos operativos estándar de sanitización: implementación y validación*. México: BM Editores.

CAPÍTULO 12
CACTÁCEAS COMESTIBLES
ALIMENTOS DE CONSUMO TRADICIONAL
Y UNA FUENTE POTENCIAL DE COMPUESTOS
CON ACTIVIDAD BIOLÓGICA

A. ALEJANDRA LÓPEZ-PÉREZ
LOURDES SANTIAGO-LÓPEZ
ADRIÁN HERNÁNDEZ-MENDOZA
BELINDA VALLEJO-CÓRDOBA
AARÓN FERNANDO GONZÁLEZ-CÓRDOVA¹

RESUMEN

El consumo de cactáceas, originarias de México, ha ganado popularidad en los últimos años no sólo por su aporte nutricional, sino también por su aplicación en el área de la medicina. Se ha demostrado que su consumo ofrece beneficios nutricionales y además, puede promover efectos en la salud. Esto, en gran parte, se debe a sus características químicas y nutricionales que las constituye en fuente potencial para la obtención de diferentes compuestos con actividad biológica y de interés farmacéutico (*e.g.*, gomas, resinas, látex, almidón, granos, proteínas, ácidos grasos polinsaturados, vitaminas, minerales, fitoquímicos). En este sentido, la obtención de bioactivos ha sido una de las principales vías de estudio, ya que estos compuestos se pueden encontrar en los frutos, semillas, tallos, raíces, rizomas o bulbos. Algunos compuestos bioactivos estudiados han demostrado principalmente poseer capacidad antioxidante, sin descartar la posibilidad de que algunos de ellos causen efectos menos explorados y que puedan ser de interés en el área de la salud e incluso para su aplicación en la industria de alimentos. El objetivo del presente capítulo

¹ Laboratorio de Calidad, Autenticidad y Trazabilidad de los Alimentos. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C. (CIAD, A.C.), Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas, No. 46 Col. La Victoria, CP. 83304, Hermosillo, Sonora, México. Autor de correspondencia: aaronglz@ciad.mx

es mostrar la información disponible sobre el potencial que ofrecen las cactáceas comestibles para la obtención de compuestos bioactivos con potencial uso en la industria de alimentos y farmacéuticos.

PALABRAS CLAVE: actividad biológica, cactáceas comestibles, compuestos bioactivos, productos comerciales.

INTRODUCCIÓN

La familia de cactáceas (*Caryophyllales*) comprende alrededor de 1 600 especies, las cuales se encuentran distribuidas entre 4 subfamilias: *Opuntioideae*, *Maihuenioideae*, *Cactoideae* y *Pereskioideae*. Su uso ha sido muy extenso entre la ciencia y tecnología en el área de alimentos y la medicina (Nazareno y Padrón, 2011). En este sentido, alrededor de 35 especies tienen potencial como cultivo para la obtención de frutos, vegetales o forraje. Entre ellos podemos encontrar tres tipos: las tunas, las pitahayas (trepadoras) y las pereskias (columnares) (Esquivel, 2004).

Las cactáceas se han destacado por su gran valor comercial debido a que tienen un menor aporte calórico y se caracterizan por su contenido de fibra. En este sentido se destacan las tunas, consideradas nativas de México, mientras que los frutos de cactáceas trepadoras, como la pitahaya o pitahaya, contienen semillas digeribles que, a diferencia de las tunas, no presentan espinas típicas (Corzo-Ríos *et al.*, 2016; Esquivel, 2004). En la actualidad se conocen una gran variedad de productos comerciales dirigidos sobre todo a la industria alimentaria, los cuales son de gran importancia debido a los nutrientes potencialmente activos y a las propiedades multifuncionales que han demostrado. Dentro de las frutas más comunes se encuentran la tuna (*Opuntia ficus-indica*), la pitahaya de mayo (*Stenocereus* spp) y la pitahaya (*Hylocereus* spp) (Corzo-Ríos *et al.*, 2016; Herrera *et al.*, 2014).

Las cactáceas comestibles han comenzado a destacarse no sólo por su valor nutricional, sino porque además contienen diferentes componentes bioactivos (*e.g.*, compuestos fenólicos, flavonoides, ácidos grasos polinsaturados, vitaminas, minerales, esteroides, aminoácidos) que pueden estar presentes en la cáscara, pulpa y semillas de algunos frutos de cactáceas (Corzo-Ríos *et al.*, 2016; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2020).

La demanda de este tipo de productos se ha incrementado debido a la gran diversidad de compuestos que poseen y que han demostrado un papel importante en la prevención de enfermedades crónicas (Corzo-Ríos *et al.*, 2016). Por ejemplo, en el caso de los cactus, se ha demostrado que el mucílago cuenta con capacidad inmunomoduladora, efecto hipoglucémico, y mejora del microambiente intestinal (El-Mostafa *et al.*, 2014), actividad antimicrobiana, antiinflamatoria, analgésica, prevención de

úlceras y propiedades antiproliferativas (De Silveira Agostini-Costa, T, 2020; Xu *et al.* 2016).

En este sentido, el objetivo del presente capítulo es mostrar la información disponible sobre el potencial que ofrecen las cactáceas comestibles para la obtención de compuestos bioactivos con posible uso en la industria de alimentos y farmacéuticos.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE CACTÁCEAS COMESTIBLES

Entre la gran variedad de cactáceas que existen se encuentran especies que se han consumido desde la antigüedad debido a su sabor y a los efectos benéficos que éstas han demostrado. Hoy en día se tienen algunos reportes sobre los efectos atribuidos a las cactáceas, que en su mayoría se deben a la presencia de componentes bioactivos como vitaminas, aminoácidos, carotenoides, fibras y compuestos antioxidantes (cuadro 1) (El-Mostafa *et al.*, 2014). Cada uno de estos grupos que se han estudiado se documentan en las siguientes secciones para las principales cactáceas que los contienen.

CUADRO 1
 COMPUESTOS CON ACTIVIDAD BIOLÓGICA DE CACTÁCEAS COMESTIBLES
 EVALUADOS EN DIFERENTES MODELOS DE ESTUDIO

Cactácea	Compuesto bioactivo	Contenido aproximado/100g de peso seco	Tipo de estudio	Actividad biológica	Referencia
Tuna	Betacianinas	0.21-59.18 mg	<i>In vitro</i>	Actividad antioxidante	Ramírez-Ramos <i>et al.</i> , 2015
	Betaxantinas	0.12-24.07 mg			
	Compuestos fenólicos	153.1-165.5 mg			
	Ácido ascórbico	14.52 ± 0.08	<i>In vitro</i>		Moreno <i>et al.</i> , 2003
	Flavonoides	1.34-11.21 mg	<i>In vitro</i>	Antioxidante anticancerígena	Ramírez-Ramos <i>et al.</i> , 2015; Martínez-Flórez <i>et al.</i> , 2002

CUADRO 1
 COMPUESTOS CON ACTIVIDAD BIOLÓGICA DE CACTÁCEAS COMESTIBLES

EVALUADOS EN DIFERENTES MODELOS DE ESTUDIO <i>(continuación)</i>					
Cactácea	Compuesto bioactivo	Contenido aproximado/100 g de peso seco	Tipo de estudio	Actividad biológica	Referencia
Nopal	Polifenoles	218.8 mg	<i>In vitro</i>	Antioxidantes, antiinflamatoria, anticancerígena	El Mostafa <i>et al.</i> , 2014
	Flavonoides	0.22-4.32 mg			
	Ácidos grasos	53.5% en el aceite de semilla de nopal			
Pitahaya	Ácido ascórbico	4-25 mg	<i>In vivo</i>	Capacidad antioxidante	Verona-Ruiz <i>et al.</i> , 2020.
	Betalainas	9 mg/L en 20 g de polvo de pitahaya			
Pitahaya	Compuestos fenólicos	1482 - 2006 mg de eq. ácido gálico	<i>In vivo</i>	Actividad antioxidante, antiinflamatoria, anticancerígena y hepatoprotectora	Corzo-Ríos <i>et al.</i> , 2016
	Betalainas	347.30 - 20.98 mg			
	Ácido ascórbico	17 mg			
Pereskias	Contenido fenólico total	40.82 mg GAE /g	<i>In vitro</i>	Actividad antioxidante y antimicrobiana	Johari y Khong, 2019
	b-caroteno	39.3 ug/g			
	a-caroteno	35.1 ug/g			
Cactus de baya	Betalainas	103.08 ± 2.3 mg/kg de peso fresco	<i>In vivo</i>	Propiedades antiinflamatoria, antioxidantes anticlastogénicos y anticancerígenos	López-Palestina <i>et al.</i> , 2019
	Fenoles totales	11909.40 ± 129.02 mg EAG			
	Ácido ascórbico	381.63 ± 15.23 mg por kg de peso fresco			
	Flavonoles	6683.92 ± 13.24 mg			

Tuna (Opuntia ficus-indica)

El género *Opuntia* es complejo e incluye a las especies conocidas tradicionalmente como “nopalitos”, en su etapa tierna, o por sus frutos, llamados tunas y xoconostles. En general este grupo se caracteriza por su sabor dulce, en el caso de las tunas, y un sabor ácido para los xoconostles (Monroy-Gutiérrez *et al.*, 2017). Además, este grupo se destaca por su alto contenido de Ca, K, azúcares, fibra dietética, ácido ascórbico, polifenoles, carotenoides y pigmentos (Pimienta-Barrios *et al.*, 2008). En el caso particular de la tuna, ésta cuenta con una taxonomía muy compleja; sin embargo, se pueden diferenciar según sus características fisiológicas, como el color de la pulpa y el grosor de la cáscara, que varían según el ambiente del cultivo (Martínez-González *et al.*, 2019; Pacheco *et al.*, 2020). Su composición nutrimental comprende entre 85 y 89% de humedad, 12-17% de hidratos de carbono, 0.21-1.6% de proteína y 0.09-0.7 de lípidos (Cota-Sánchez, 2016).

Entre los componentes bioactivos reportados se encuentran las betalaínas, que se extraen de la cáscara y la pulpa, siendo la betacianinas y betaxantinas las que se encuentran en mayor proporción y son conocidas por su capacidad antioxidante (Ramírez-Ramos *et al.*, 2015). Asimismo, se han encontrado compuestos fenólicos, principalmente en variedades púrpuras y rojas, identificándose un mayor contenido de antioxidantes, el cual oscila entre 153.1 y 165.5 mg equivalentes de ácido gálico, por cada 100 g de peso fresco, en comparación con otras variedades. Dichos compuestos son de interés debido a sus propiedades antioxidantes (Ramírez-Ramos *et al.*, 2015; Martínez-Valverde *et al.*, 2000).

Cabe señalar que su importancia radica en la aplicación potencial en la industria farmacológica debido a su relación positiva con la salud. En la actualidad es posible encontrar a la tuna en 32 países, sobre todo Argentina, Sudáfrica, Estados Unidos y México.

Pitahaya (Hylocereus spp.)

La pitahaya es un fruto del género *Hylocereus* spp., conocido comúnmente como “fruta del dragón”; es un fruto exótico con forma de elipse y diámetro

de aproximadamente 12 cm; su pulpa tiene un sabor agridulce y consistencia carnosa. Tiene gran importancia comercial debido a sus características organolépticas, nutricionales, fisicoquímicas, y por sus compuestos bioactivos. Este fruto se puede encontrar en color amarillo, púrpura, rojo y blanco (Campos-Rojas *et al.*, 2011; Verona-Ruiz *et al.*, 2020).

La pulpa constituye entre 60 y 80% de su peso total, dependiendo de la especie y etapa de maduración. Sin embargo, su composición se va modificando durante el proceso de maduración. Por ejemplo, en el caso de la Pitahaya amarilla (*S. megalanthus*), el porcentaje de cascará disminuye en los diferentes estados de maduración (valor de 0 indica un color verde; y 6, amarillo), de 55.93% a 22.53%, mientras que la pulpa tiene un aumento de 44.07% a 66.60% (Sotomayor *et al.*, 2019). En el caso particular de la variedad roja *H. undatus*, por cada 100 g de ésta se tienen 14.84 g de proteína, 39.94 mg de minerales (fósforo, zinc, potasio y calcio) y 21.50 g de fibra. Además, esta fruta se destaca por su contenido de vitamina C (25 mg) similar a la variedad amarilla, que varía de 4 a 20 mg dependiendo de su lugar de origen. En la pitahaya amarilla, el contenido de sólidos totales se encuentra en un rango de 12 a 15° Brix, 0.2 a 0.35 mg de ácido málico, y un valor de pH entre 4.3 y 4.7 en fruto fresco (Verona-Ruiz *et al.*, 2020). Por su parte, Altuna *et al.* (2018) reportaron un alto contenido de ácidos grasos (*e.g.*, palmítico, esteárico, oleico, vaccénico, linoleico), considerando sus características; tiene potencial para ser considerada en la industria de alimentos, así como en la mejora de la salud humana.

Pitahaya (Stenocereus spp.)

La pitahaya (*Stenocereus* spp.) es un fruto exótico que se produce en cactus columnares, los cuales se localizan en zonas áridas de México, Colombia, Estados Unidos, Venezuela y Costa Rica. Se caracteriza por su sabor agridulce y se le comercia como fruta fresca, aguas frescas, helado y mermeladas (Campos-Rojas *et al.*, 2011). Hasta el momento se conocen 24 especies de pitahaya, de las cuales el 80% se encuentran en México. Su valor energético en una porción de 100 g es de 51.86 Kcal y su valor nutricional corresponde a 2.2 g de fibra, 11.2 g de carbohidratos

y 1.7 g de proteína, mientras que contiene 17 mg de vitamina C (Quiroz-González *et al.*, 2018).

Las características de este fruto la hacen atractiva para su potencial uso en la industria de alimentos debido a su alto contenido de antioxidantes y compuestos bioactivos. En particular, algunos estudios se han centrado en la caracterización de compuestos fenólicos, minerales y betalaínas (betanina, indicaxantina, betadinina y filocatina), destacando en esta última *S. stellatus*, que se cultiva en Puebla (García-Cruz *et al.*, 2012; Pérez-Loredo *et al.*, 2017). Además de la presencia de ácido ascórbico, pectina, ácido cafeico y flavonoides (Alvarado-Sizzo *et al.*, 2018; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2020).

Nopal (Opuntia spp.)

La planta de nopal se caracteriza por su forma arbustiva que alcanza una altura de hasta 5 metros, y se pueden encontrar hasta 1 500 especies; los tallos son suculentos y se llaman comúnmente pencas. Es una planta tropical y subtropical que crece en zonas áridas y semiáridas distribuidas en México, América Latina, sur de África y países del Mediterráneo. El nopal ha formado parte de la nutrición básica en diversos lugares del mundo, y hoy en día se ha extrapolado su uso en derivados como el té, los jugos y extractos de aceite, además de la obtención de extractos como tratamiento herbal (El-Mostafa *et al.*, 2014).

En cuanto a su composición química, ésta es 91% de humedad, 1.58% de cenizas, 5.5% de carbohidratos, 0.66% proteínas y 1.15% celulosa, además que contiene vitaminas C y E, fibra dietética y fitoquímicos. Asimismo, el fruto es una fuente rica en carotenoides, esteroides, ésteres y alcaloides. Su aporte calórico es de únicamente 27 kcal por cada 100 g. Su parte comestible abarca la pulpa y semillas del fruto (Maki-Díaz *et al.*, 2015; Torres, 2015). Evidencia científica ha sido documentada sobre la presencia de compuestos naturales que promueven la salud, lo cual ha sido de interés tanto en el área de la medicina como en la industria de alimentos (Alimi *et al.*, 2010; Morales *et al.*, 2012; Valente *et al.*, 2010).

En cuanto a compuestos bioactivos promotores de la salud, se ha documentado la presencia de polifenoles, alcaloides, indicaxantina,

neobetaminas, y flavonoides, los cuales en general se caracterizan por su potencial actividad antioxidante y antiinflamatoria. En particular, su contenido de proteína, abundante en los extractos de cladodios, ha demostrado efecto antidiabético y potencial actividad de antiglicación (El-Mostafa *et al.*, 2014). Las flores de la planta contienen los principales componentes bioactivos, que son los flavonoides, en su mayoría quercetina y kaempferol (Alimi *et al.*, 2010; Butera *et al.*, 2002).

Pereskias spp

Las pereskias (*Pereskia* spp) son plantas trepadoras e incluyen 17 especies, entre las que destacan *P. aculeata* y *P. grandifolia*. Su producción se ha reportado principalmente en Argentina, Perú y Brasil. Los frutos de la especie *P. aculeata* son de tipo cactidio; tienen semillas, inmersas en su masa gelatinosa, y sus colores varían entre rojo y amarillo. Su composición es de 0.7% lípidos, 1% proteínas, 6.3% carbohidratos, aproximadamente 9.4% de fibra, y han sido utilizados en medicina como antisifilíticos, enfermedades de la piel y tratamientos contra la inflamación. Adicionalmente, el tallo y frutos de esta planta son comestibles; por ejemplo, las hojas de especies del género *Pereskia* tienen altos niveles de proteínas (principalmente constituidas por lisina) y aminoácido triptófano, además de su contenido de calcio, zinc, magnesio, manganeso, fibra dietética, vitaminas B9, E y C, y bajos niveles de lípidos. Éste ha sido un gran hallazgo ya que se encuentran en grandes cantidades en comparación con otras plantas comestibles que usualmente se consumen en mayor proporción, como la espinaca y la lechuga (De Castro y Scio, 2014).

Cactus de baya (Myrtillocactus spp)

La baya de cactus perteneciente al género *Myrtillocactus*, crece en México en los estados de Guanajuato, Hidalgo, Durango, Estado de México, Puebla, Michoacán y Veracruz, por mencionar algunos. Su forma es globular, con aproximadamente 1.5 cm de diámetro; estos frutos generalmente son de coloración roja a púrpura, y la pulpa es protegida con una delgada

cáscara. Los frutos suelen utilizarse para producir nieve, mermeladas y bebidas alcohólicas. En la actualidad se sabe que cuentan con un alto potencial nutricional ya que en una porción de 100 g contienen 10.4 g de carbohidratos, 3.4 g de proteína y 2.1 g de fibra. Además, son una fuente abundante de vitaminas y minerales (manganeso, calcio y potasio). Sin embargo, las propiedades fisicoquímicas y compuestos bioactivos aún no se encuentran estudiadas por completo o son pocos los estudios que se han reportado. Algunos compuestos que se han documentado son beta-láinas, pectinas, vitamina C, compuestos fenólicos y flavonoles (López-Palestina *et al.*, 2019; Pérez-Negrón *et al.*, 2014).

MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS

La mayoría de las cactáceas se consumen como producto fresco o mínimamente procesados, pero se ha documentado que este tipo de alimento contienen una gran cantidad de compuestos bioactivos, lo cual puede incrementar su valor comercial y su uso en diversas áreas (Pérez-Loredo *et al.*, 2017). Los compuestos bioactivos en las cactáceas se pueden extraer utilizando métodos convencionales (*e.g.*, maceración, reflujo o extracción Soxhlet), los cuales tienen la ventaja de ser métodos rápidos, relativamente más sencillos y de bajo costo. Sin embargo, se pueden emplear métodos no convencionales que pueden mejorar la eficiencia de extracción de los diferentes compuestos (Pérez-Loredo *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2011).

A diferencia de los métodos convencionales, los métodos no convencionales tanto físicos o químicos han demostrado tener un mejor rendimiento y calidad además de la reducción del tiempo operativo. La digestión enzimática, extrusión, microondas, pulsos eléctricos, ultrasonido y fluidos supercríticos son utilizados para la selectividad de compuestos bioactivos (Azmir *et al.*, 2013; Pérez-Loredo *et al.*, 2017).

El ultrasonido funciona con un tipo de onda de sonido que produce una frecuencia de 20-100 MHz, el cual favorece tanto la difusión a través de la pared celular como su lavado cuando las células se rompen. Este método se ha empleado, por ejemplo, para la extracción de pigmentos naturales de algunos vegetales (Sivakumar *et al.*, 2009). Por otro lado, la extracción por microondas participa en la separación de solutos al

incrementar la temperatura y presión, seguida de la difusión de disolvente, por lo que finalmente logran liberar los solutos al disolvente; éstos son utilizadas principalmente en el procedimiento de extracción para la obtención de polifenoles y betalaínas (Cardoso-Ugarte *et al.*, 2014; Villalobos-Castillejos *et al.*, 2013).

Otro método que se ha reportado es la cavitación, el cual se ha usado para extraer diversos componentes, además de ayudar a disminuir contaminantes y facilitar la extracción del compuesto de interés utilizando diferentes ondas de sonido (Azmir *et al.*, 2013; Espinosa *et al.*, 2016; Pérez-Loredo *et al.*, 2017).

Otro método de extracción de compuestos bioactivos es adicionando enzimas como celulasa, pectinasa y α -amilasa, ya que favorecen la extracción al hidrolizar polisacáridos que conforman la pared celular del producto. La extracción de compuestos bioactivos con enzimas, la composición, concentración y tipo de enzima, así como el tamaño de partícula de la matriz de estudio, la relación sólido-agua y el tipo de hidrólisis son determinantes para la obtención de compuestos (Pérez-Loredo *et al.*, 2017).

Por ejemplo, en el estudio reportado por Pérez-Loredo *et al.* (2017) se utilizaron microondas, ultrasonido y enzimas para una mayor eficiencia en la obtención de betacianinas (Bc), betaxantinas (Bx), betalaínas totales (BT) y compuestos fenólicos (CF). El tratamiento de ultrasonificación en la pulpa de semilla aumentó la cantidad de Bc, Bx y BT, mientras que el uso de pectinasas aumentó CF, y esto se reflejó en un incremento de la actividad antioxidante.

En el caso del nopal, el estudio realizado por Figueroa-Pérez *et al.* (2018) analizó los cladodios en una etapa de maduración para consumo humano. El producto fue deshidratado hasta obtener la harina y se evaluó el perfil fitoquímico mediante HPLC-DAD, donde se encontró un alto contenido de ácido p -hidroxibenzoico, ácido p -cumárico, rutina, narcisina, nicotiflorina, β -sitoesterol y sitoesterol-3- β -glucopiranosas, así como diversos aminoácidos, ácidos orgánicos y ácidos grasos.

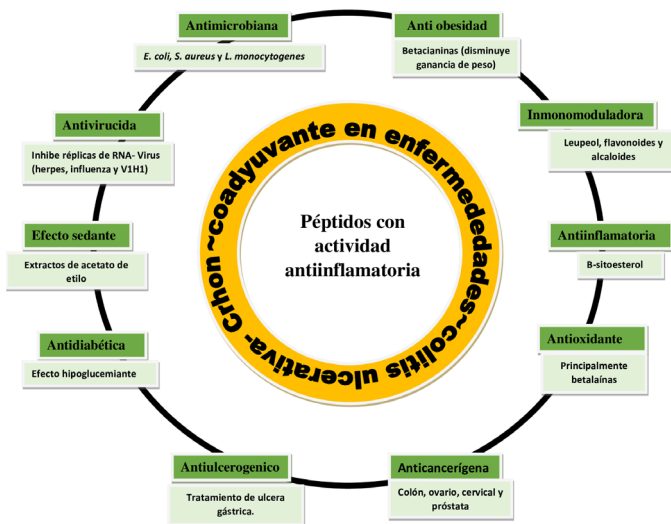
Es importante considerar que durante estos procesos factores como el pH, la luz, la temperatura y la polaridad de solventes son importantes para la extracción de los compuestos bioactivos. Se ha demostrado también que, para conservar la bioactividad del compuesto, la técnica

de microencapsulación (tecnología que empaqueta materiales de distinta consistencia en una microcápsula) ayuda a incrementar la vida útil del compuesto de interés, y en el marco de las cactáceas comestibles esto se ha aplicado para conservar los pigmentos de tuna púrpura, principalmente por su sensibilidad a la luz, al oxígeno y la humedad (Espinosa *et al.*, 2016; Pastrana *et al.*, 2017).

Actividad biológica

Las cactáceas ofrecen grandes beneficios a la salud, que han sido evaluados en los últimos años, aunque la evidencia aún sigue siendo limitada. Ciertas especies de cactáceas se han destacado por su actividad antioxidante y antiinflamatoria. Sin embargo, se han documentado efectos en la salud que se han asociado a ciertos compuestos bioactivos presentes en algunas cactáceas comestibles (figura 1). Algunos ejemplos se describen en las siguientes secciones.

FIGURA 1



Efectos beneficiosos atribuidos a los compuestos bioactivos presentes en cactáceas.

Fuente: Elaboración propia.

Actividad anticancerígena

El estudio realizado por Shreekanth *et al.* (2007) demostró que la betanina, un pigmento de la betacianina obtenido de los frutos de tuna, mostró una actividad antiproliferativa en la línea celular de leucemia mieloide crónica humana K562. Adicionalmente, la aplicación de la betanina indujo la liberación de citocromo, la escisión de la poli (ADP) ribosoma polimerasa, la regulación de Bcl-2 y una reducción en el potencial de membrana. Por tanto, éste compuesto induce un proceso de apoptosis a través de la vía intrínseca y es mediada por la liberación de citocromo de las mitocondrias al citosol. De esta manera, los compuestos de *Opuntia ficus indica* muestran potencial para ser estudiados a mayor profundidad para este tipo de padecimientos. El uso de residuos agroindustriales ha cobrado gran relevancia en los últimos años, de tal forma que puedan ser utilizados en diferentes áreas. A los residuos de *Opuntia* spp derivados de la elaboración de zumo de frutos se les evaluó su capacidad antiproliferativa en la línea celular de carcinoma de colon humano HT29, pues inhibe el crecimiento de las células cancerígenas e induce la detección del ciclo celular. Este efecto se asoció a la presencia de compuestos como betacianinas, flavonoides y ácido ferúlico (Serra *et al.*, 2013).

Actividad antioxidante

La actividad antioxidante atribuida a los compuestos presentes en cactáceas ha sido mayormente reportada, principalmente para el género *Opuntia* spp (De Santiago *et al.*, 2018; El-Mostafa *et al.*, 2014; Ramírez-Moreno *et al.*, 2017). Algunos estudios han atribuido un mayor efecto antioxidante de betacianinas y betaxantinas, incluso mayor que el ácido ascórbico (vitamina C). Además, la posición del grupo hidroxilo determina el nivel de actividad antioxidante de los fenoles, flavonoides y otros compuestos fenólicos que se pueden encontrar en las frutas de *Opuntia*. De esta manera, en la actualidad se conoce que hay mayor cantidad de betaxantina en la tuna morada, seguida de la tuna roja, amarilla y blanca (Aruwa *et al.*, 2018; Corzo-Ríos *et al.*, 2016; Stintzing *et al.*, 2005).

El aceite de nopal verde mostró una mayor actividad antioxidante, y ésta fue dependiente de la variedad de nopal estudiada. El principal ácido graso identificado fue el ácido linoleico como predominante (Ramírez-Moreno *et al.*, 2017). Extractos con compuestos fenólicos de harina de nopal obtenidos por Soxhlet mostraron una alta capacidad antioxidante, lo cual indica que la harina de nopal puede no sólo ser utilizada como alimento, sino puede ser aplicable para estudiarse como nutracéutico (Ammar *et al.*, 2015). El contenido de compuestos fenólicos en diferentes muestras de nopal mostró actividad antioxidante (Andreu *et al.*, 2018).

La cáscara de pitahaya (*H. undatus*) se caracteriza por su alto contenido de antocianinas y flavonoides, los cuales tienen importante actividad antioxidante al captar radicales libres causantes del estrés oxidativo (Figuroa *et al.*, 2011), que se han asociado con una mejora en los niveles de colesterol (Faridah, 2015; Verona-Ruiz *et al.*, 2020).

Antiulcerogénico

Se ha reportado que el jugo de la tuna es abundante en compuestos fenólicos e inhibió la actividad ulcerogénica *in vivo*. El efecto se demostró al incrementar la producción de moco y la restauración de la arquitectura normal de la mucosa (Galati *et al.*, 2003). También, a partir de la experimentación del extracto de raíz proveniente de la tuna, se encontró una relación de los compuestos activos y su capacidad de eliminación de radicales libres asociados a la actividad antiulcerogénica. Además, en algunos países se utiliza el nopal para el tratamiento de ulcera gástrica (Alimi *et al.*, 2010).

Actividad antimicrobiana

Estudios han demostrado que las cactáceas cuentan con compuestos bioactivos que ejercen actividad antimicrobiana. Los aceites obtenidos de dos variedades de cactus mostraron inhibición contra *Saccharomyces cerevisiae* (Ramírez-Moreno *et al.*, 2017). Extractos metanólicos mostraron inhibir el crecimiento de *Campylobacter jejuni*, *C. coli*, *Vibrio cholerae*,

Staphylococcus aureus, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Bacillus subtilis* (Castillo *et al.*, 2011; Ennouri *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2010).

Recientemente se han realizado avances científicos en el que se han desarrollado vinagres a partir de subproductos de la pitahaya. El desarrollo de este vinagre mostró actividad antimicrobiana contra *E.coli*, *S. aureus* y *L. monocytogenes* (Fernandes *et al.*, 2019).

Otros

Otro de los campos en los que se han reportado los beneficios de las cactáceas es en el publicado por Akkol *et al.* (2020), en el que se demostró que los frutos de *Opuntia ficus indica* se pueden utilizar para el tratamiento de diabetes, asma, quemaduras, estreñimiento, cálculos reumáticos y como sedante en medicina, como se utiliza comúnmente en Turquía. Por otro lado, se demostró que la pitahaya (*H. polyrhizus*) tiene distintas actividades biológicas debido a sus compuestos bioactivos, como antidiabética, reduce el riesgo cardiovascular y además inhibe el desarrollo de células cancerígenas en una línea celular en la piel (Wahdaningsih *et al.*, 2020).

Por ejemplo, el consumo de nopal en personas que padecen síndrome metabólico presentaron una disminución en el colesterol, asociada a su alto contenido de pectina; y el mismo efecto se obtuvo en ratas con obesidad inducida (Hwang *et al.*, 2017).

Extractos de cladodios de *Opuntia* mostraron actividad antiviral al inhibir la replicación intracelular de un número de DNA- y RNA-virus (e.g., herpes simple, virus de la influenza, herpes equino, V1H1). Además de atribuir al β -sitosterol, actividad antiinflamatoria y analgésica, mientras que la presencia de flavonoides quercetina, dihidroquercetina y quercetina-3-metil-eter han demostrado actividad neuroprotectora (Corzo-Ríos *et al.*, 2016). Éstas son sólo algunas de las bioactividades que han comenzado a explorarse en cactáceas, e incluso algunas de ellas ya se pueden encontrar disponibles en el mercado.

PRODUCTOS EN EL MERCADO

Las cactáceas se han utilizado de manera distinta en múltiples países; en México y Canadá usualmente se consumen como fuente alimentaria, y en Estados Unidos de América como medicina y aplicación en cosméticos. Entre los usos tradicionales que se les ha dado a las cactáceas desde la antigüedad en distintos países se encuentran el tratamiento de quemaduras, indigestión y contra edemas. Sin embargo, considerando el avance de la tecnología, en los últimos años se han reportado nuevos potenciales de uso, principalmente para la medicina tradicional (Das *et al.*, 2020)

No obstante, se han creado una gran variedad de productos comerciales utilizando directamente el producto o subproductos obtenidos después del proceso industrial. Algunos de los productos que se han realizado son jabones y champú. Por otro lado, en el ámbito alimentario se encuentran panes, pudines, mermeladas, jugos, alcohol, vinos, fruta congelada, pasteles y dulces. Por último, se han utilizado otros productos para la construcción de techos de casas. Sin embargo, debido a sus propiedades conocidas que le brindan propiedades farmacológicas se utilizan mayormente en el campo medicinal (Das *et al.*, 2020; Sáenz, 2000). Algunos de los principales productos se enlistan en el cuadro 2.

CUADRO 2
PRODUCTOS EN EL MERCADO ELABORADOS
CON CACTÁCEAS COMESTIBLES

Especie	Lugar	Destino	Producto	Referencia
<i>Pereskia aculeata</i>	No reportado	Industrial	Películas y recubrimientos	Das <i>et al.</i> , 2020
<i>Opuntia cochenillifera</i>	No reportado	Industria cosmética	Cosméticos	
<i>Opuntia ficus-indica</i>	Brasil	Higiene	Champú Jabón	De Lucena <i>et al.</i> , 2013
	Italia	Medicina Alimento	Diurético Aditivo alimentario	Das <i>et al.</i> , 2020 Nazareno y Padrón, 2011
<i>Pilosocereus gounellei</i>	Brasil	Alimento	Galletas	De Lucena <i>et al.</i> , 2013

CUADRO 2
 PRODUCTOS EN EL MERCADO ELABORADOS
 CON CACTÁCEAS COMESTIBLES

Especie	Lugar	Destino	Producto	Referencia
<i>Myrtillocactus</i> spp.	México	Alimento	Helados	Ozuna <i>et al.</i> , 2016
<i>Opuntia dillenii</i>	No reportado	Bebida	Cerveza	Nazareno y Padrón, 2011
<i>Stenocereus</i> <i>griseus</i>	Venezuela	Alimento	Mermelada	Nazareno y Padrón, 2011

(continuación)

PERSPECTIVAS DE POTENCIAL DE APLICACIÓN

En la actualidad, las personas han incrementado su interés en mejorar la dieta diaria y en informarse sobre cómo los alimentos intervienen positivamente en su salud al consumirlos, por lo que gran parte de los consumidores buscan nuevos productos con propiedades funcionales. Un ejemplo de este tipo sería el nopal, el cual ha demostrado múltiples beneficios, por lo que se recomienda consumir en la dieta diaria, ya sea añadiéndolo como alimento (nopalitos frescos, mermeladas, harinas) o como bebida (Sáenz, 2000; Tilahun y Welegerima, 2018). Adicionado a esto, el nopal proporciona un efecto antidepresivo por dos flavonoides encontrados (quercetina y kaempferol), por lo que se conoce que su mayor potencial se encuentra en el campo medicinal y alimentario (Osuna-Martínez *et al.*, 2014). Sin embargo, uno de los inconvenientes para el comercio de las cactáceas comestibles, como el nopal, sería su corta vida de anaquel, por lo que se ha recurrido a tecnologías de conservación, como el deshidratado. En cuanto a esto, se ha reportado que el consumo de fibra ayuda a prevenir enfermedades como diabetes y obesidad (Torres-Ponce *et al.*, 2015).

Por otro lado, una de las razones por las que se busca aprovechar todo el fruto es debido a que las empresas generan una gran cantidad de subproductos, por lo que proporcionar un valor agregado generará un beneficio-costo favorable para las empresas. Además, se apoya al medio ambiente al aprovecharse todo el fruto; tal es el caso de la pitahaya, de

la cual se conoce que su cáscara es bastante gruesa y actualmente se desperdicia, por lo que surgió el interés de aprovecharla ya que, a partir de estudios, se encontraron compuestos con actividad inmonomoduladora, por lo que ahora se puede considerar con potencial farmacéutico (Wahdaningsih *et al.*, 2020). Sin embargo, para la utilización de estos subproductos se requiere garantizar la ausencia de pesticidas e inocuidad, además de elaborar ideas de creativas que satisfagan las necesidades del consumidor (Sumaya-Martínez *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

Las cactáceas comestibles tienen un gran impacto en la dieta, principalmente de los mexicanos, debido a su fácil acceso y a la gran diversidad de climas que se encuentran en nuestro país, lo cual favorece su crecimiento de cultivo, por lo que promover su consumo podría ayudar como tratamiento para problemas de diabetes, obesidad y cancerígenos, entre otros. En la actualidad, la importancia que se ha dado a los alimentos naturales ha generado varias preguntas de investigación no sólo desde el aporte nutricional, sino la parte funcional, teniendo en mente futuros productos alimenticios y farmacéuticos que puedan brindar mayores beneficios para la salud del consumidor.

REFERENCIAS

- AGOSTINI-COSTA, T. S., Pêsoa, G. K. A., Silva, D. B., Gomes, I. S., y Silva, J. P. (2014). "Carotenoid composition of berries and leaves from a Cactaceae-Pereskia sp", *Journal of Functional Foods*, 11, 178-184.
- AKKOL, E. K., Ilhan, M., Karpuz, B., Genç, Y., y Sobarzo-Sánchez, E. (2020). "Sedative and anxiolytic activities of *Opuntia ficus indica* (L.) Mill: an experimental assessment in mice", *Molecules*, 25(8), 1844.
- ALIMI, H., Hfaiedh, N., Bouoni, Z., Hfaiedh, M., Sakly, M., Zourgui, L., y Rhouma, K. (2010). "Antioxidant and antiulcerogenic

- activities of *Opuntia ficus indica f. inermis* root extract in rats”, *Phytomedicine*, 17(14), 1120-1126.
- ALTUNA, J. L., Silva, M., Álvarez, M., Quinteros, M. F., y Carrillo, W. (2018). “Yellow pitahaya (*Hylocereus megalanthus*) fatty acids composition from Ecuadorian Amazonia”, *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 11, 218-221.
- ALVARADO-SIZZO, H., Casas, A., Parra, F., Arreola-Nava, H. J., Terrazas, T., y Sánchez, C. (2018). “Species delimitation in the *Stenocereus griseus* (Cactaceae) species complex reveals a new species, *S. huastecorum*”, *PloS one*, 13(1), e0190385.
- AMMAR, I., Ennouri, M., y Attia, H. (2015). “Phenolic content and antioxidant activity of cactus (*Opuntia ficus-indica* L.) flowers are modified according to the extraction method”, *Industrial Crops and Products*, 64, 97-104.
- ANDREU, L., Nuncio-Jáuregui, N., Carbonell-Barrachina, Á. A., Legua, P., y Hernández, F. (2018). “Antioxidant properties and chemical characterization of Spanish *Opuntia ficus-indica* Mill. cladodes and fruits”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), 1566-1573.
- ARUWA, C. E., Amoo, S. O., y Kudanga, T. (2018). “*Opuntia* (Cactaceae) plant compounds, biological activities and prospects –A comprehensive review”, *Food Research International*, 112, 328-344.
- AZMIR, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M. H. A., Ghafoor, K., Norulaini, N. A. N., y Omar, A. K. M. (2013). “Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: a review”, *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426-436.
- BUTERA, D., Tesoriere, L., Di Gaudio, F., Bongiorno, A., Allegra, M., Pintaudi, A. M., Kohen, R., y Livrea, M. A. (2002). “Antioxidant activities of sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: betanin and indicaxanthin”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(23), 6895-6901.
- CAMPOS-ROJAS, E., Pinedo-Espinoza, J. M., Campos-Montiel, R. G., y Hernández-Fuentes, A. D. (2011). “Evaluación de plantas de pitahaya (*Stenocereus* spp) de poblaciones naturales de Monte

- Escobedo, Zacatecas”, *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 17(3), 173-182.
- CARDOSO-UGARTE, G. A., Sosa-Morales, M. E., Ballard, T., Liceaga, A., y San Martín-González, M. F. (2014). “Microwave-assisted extraction of betalains from red beet (*Beta vulgaris*)”, *LWT-Food Science and Technology*, 59(1), 276-282.
- CASTILLO, S. L., Heredia, N., Contreras, J. F., y García, S. (2011). “Extracts of edible and medicinal plants in inhibition of growth, adherence, and cytotoxin production of *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli*”, *Journal of Food Science*, 76(6), M421-M426.
- DE CASTRO, Campos Pinto N., y Scio, E. (2014). “The biological activities and chemical composition of *Pereskia* species (*Cactaceae*)-A review”, *Plant Foods for Human Nutrition*, 69(3), 189-195.
- CORZO-RÍOS, L. J., Bautista-Ramírez, M. E., Gómez y Gómez, Y. de los M., y Torres, L. (2016). “Frutas de cactáceas: compuestos bioactivos y sus propiedades nutraceuticas”, en *Propiedades Funcionales de hoy*, en M.E. Ramírez Ortiz (Ed.). Alimentos Funcionales de Hoy. Barcelona, España: *OmniaScience*. 35-66.
- COTA-SÁNCHEZ, J. H. (2016). “Nutritional composition of the prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit”, *Nutritional Composition of Fruit Cultivar. Academic Press*. 691-712.
- DAS, G., Lim, K. J., Tantengco, O. A. G., Carag, H. M., Goncalves, S., Romano, A., Das, S. K., Coy-Barrera, E., Shin, H. S., Guitierrez-Grijalva, E. P., Heredia, J. B., y Patra, J. K. (2020). “Cactus: chemical, nutraceutical composition and potential bio-pharmacological properties”, *Phytotherapy*, 2020, 1-36.
- EL-MOSTAFA, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbj, M. S., Latruffe, N., Lizard, G., Nasser, B., y Cherkaoui-Malki, M., (2014). “Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease”, *Molecules*, 19(9), 14879-14901.
- ENNOURI, M., Ammar, I., Khemakhem, B., y Attia, H. (2014). “Chemical composition and antibacterial activity of *Opuntia Ficus-Indica* F. Inermis (*Cactus Pear*) flowers”, *Journal of Medicinal Food*, 17, 908-914.

- ESPINOSA ANDREWS, H., Rodríguez-Rodríguez, R., García-Márquez, E., García-Fajardo, J. A., Torres-Martínez, L. G., Gastelum-Hernández, E., Sánchez-Contreras, M. A., Ayora-Talavera, T. R., Castillo-Herrera, G., Quiñones-Aguilar, E. E., Rincon-Enriquez, G., y Urias-Silvas, J. E. (2016). *Los compuestos bioactivos y tecnologías de extracción*. Jalisco: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.
- ESQUIVEL, P. (2004). “Los frutos de las cactáceas y su potencial como materia prima”, *Agronomía Mesoamericana*, 15(2), 215-219.
- FARIDAH, A., Holinesti, R., y Syukri, D. (2015). “Betalains from red pitahaya peel (*Hylocereus polyrhizus*): extraction, spectrophotometric & HPLC-DAD identification, bioactivity & toxicity screening”, *Pakistan Journal of Nutrition*, 14(12), 976-982.
- FERNANDES, A. C. F., de Souza, A. C., Ramos, C. L., Pereira, A. A., Schwan, R. F., y Dias, D. R. (2019). “Sensorial, antioxidant and antimicrobial evaluation of vinegars from surpluses of physalis (*Physalis pubescens* L.) and red pitahaya (*Hylocereus monacanthus*)”, *Journal of the Sciences of Food and Agriculture*, 99(5), 2267-2274.
- FIGUEROA, R., Tamayo, J., González, S., Moreno, G., y Vargas, L. (2011). “Actividad antioxidante de antocianinas presentes en cáscara de pitahaya (*Hylocereus undatus*)”, *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 12(1), 44-50.
- FIGUEROA-PÉREZ, M. G., Pérez-Ramírez, I. F., Paredes-López, O., Mondragón-Jacobo, C., y Reynoso-Camacho, R. (2018). “Phytochemical composition and in vitro analysis of nopal (*O. ficus-indica*) cladodes at different stages of maturity”, *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1728-1742.
- GALATI, E. M., Mondello, M. R., Giuffrida, D., Dugo, G., Miceli, N., Pergolizzi, S., y Taviano, M. F. (2003). “Chemical characterization and biological effects of Sicilian *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. fruit juice: antioxidant and antiulcerogenic activity”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(17), 4903-4908.
- GARCÍA-CRUZ, L., Salinas-Moreno, Y., y Valle-Guadarrama, S. (2012). “Betalainas, compuestos fenólicos y actividad antioxidante en pitahaya de mayo (*Stenocereus griseus* H.)”, *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35, 1-5.

- HERRERA CHALÉ, F., Betancur Ancona, D., y Segura Campos, M. R. (2014). "Compuestos bioactivos de la dieta con potencial en la prevención de patologías relacionadas con sobrepeso y obesidad; péptidos biológicamente activos", *Nutrición Hospitalaria*, 29(1), 10-20.
- HWANG, S. H., Kang, I. J., y Lim, S. S. (2017). "Antidiabetic effect of fresh nopal (*Opuntia ficus-indica*) in low-dose streptozotocin-induced diabetic rats fed a high-fat diet", *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2017, 4380721.
- JOHARI, M. A., y Khong, H. Y. (2019). "Total phenolic content and antioxidant and antibacterial activities of *Pereskia bleo*", *Advances in Pharmacological Sciences*, 2019.
- LÓPEZ-PALESTINA, C. U., Aguirre-Mancilla, C. L., Ramírez-Pimentel, J. G., Raya-Pérez, J. R., Santiago-Saenz, Y. O., Gutiérrez-Tlahque, J. C., y Hernández-Fuentes, A. D. (2019). "Compuestos bioactivos y actividad antioxidante en tres estados de madurez de *Myrtillocactus geometrizans* provenientes del Mezquite, Hidalgo", *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4, 317-322.
- DE LUCENA, C. M., de Lucena, R. F. P., Costa, G. M., Carvalho, T. K. N., da Silva Costa, G. G., da Nóbrega Alves, R. R., Pereira, D. D., da Silva Ribeiro, J. E., Alves C. A. B., Quirino, Z. G. M., y Nunes, E. N. (2013). "Use and knowledge of *Cactaceae* in Northeastern Brazil", *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 9(1), 1-11.
- MAKI-DÍAZ, G., Peña-Valdivia, C., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M., Calderón-Zavala, G., y Anaya-Rosales, S. (2015). "Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional", *Agrociencia*, 49, 31-51.
- MARTÍNEZ-FLÓREZ, S., González-Gallego, J., Culebras, J. M., y Tuñón, M. J. (2002). "Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes", *Nutrición Hospitalaria*, 17(6), 271-278.
- MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, C. R., Gallegos-Vázquez, C., Scheinvar, L., Muñoz-Díaz de León, M. E., y Jiménez-Ramírez, J. (2019). "Re-evaluation of *Opuntia matudae* (*Cactaceae*)", *Open Journal Systems*, 423(3), 158-170.

- MARTÍNEZ-VALVERDE, I., Periago, M., y Ros, G. (2000). “Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta”, *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 50(1), 5-18.
- MONROY-GUTIÉRREZ, T., Martínez-Damián, M. T., Barrientos-Priego, A. F., Gallegos-Vázquez, C., Cruz-Alvarez, O., y Vargas-Madríz, H. (2017). “Bioactive compounds and antioxidant capacity in fruits of xocotuna, cactus pear and xoconostle (*Opuntia* spp.)”, *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences, ex Agro-Ciencia*, 33(3), 263-272.
- MORALES, P., Ramírez-Moreno, E., Sánchez-Mata, M. C., Carvalho, A. M., y Ferreira, I. C. (2012). “Nutritional and antioxidant properties of pulp and seeds of two xoconostle cultivars (*Opuntia jocosostle* F.A.C. Weber ex Diguét and *Opuntia matudae* Scheinvar) of high consumption in Mexico”, *Food Research International*, 46, 279-285.
- MORENO ÁLVAREZ, M. J., Medina, C., Antón, L., García, D., y Belén Camacho, D. R. (2003). “Uso de pulpa de tuna (*Opuntia bol-dinghii*) en la elaboración de bebidas cítricas pigmentadas”, *Inter-ciencia*, 28(9), 539-543.
- NAZARENO, M. A., y Padrón, C. (2011). “Nuevas tecnologías desarrolladas para el aprovechamiento de las cactáceas en la elaboración de alimentos. Componentes funcionales y propiedades antioxidantes”, *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2(1), 202-238.
- OSUNA-MARTÍNEZ L. U., Reyes-Esparza, J., y Rodríguez-Fragoso, L. (2014). “Cactus (*Opuntia ficus-indica*): a review on its antioxidants properties and potential pharmacological use in chronic diseases”, *Natural Products Chemistry & Research*, 2(6), 153-160.
- OZUNA, C., García, A. C., Salazar, J. A. G., Solís, E. S., Morales, M. E. S., y Juárez, M. D. R. A. (2016). “Potencial de productos alimenticios originarios de la zona noreste de Guanajuato”, *Acta Universitaria*, 26(2), 83-92.
- PACHECO, A. D. J. M., Pérez, I. D. V.T., y Gil, H. A. P. (2020). “Cuantificación de pectinas en la pulpa del fruto de tres especies de tuna (*Opuntioideae*, *Cactaceae*)”, *La Técnica: Revista de las Agrociencias*, 23, 25-32.

- PASTRANA, K. G. L., Fuentes, A. D. H., Alvarado, R. J., y Montiel, R. G. C. (2017). "Microencapsulación de pigmentos naturales obtenidos de la cáscara y pulpa de frutos de *Opuntia* spp", *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 3(5).
- PIMIEN-TA-BARRIOS, E., Méndez-Morán, L., Ramírez-Hernández, B. C., de Alba-García, J. E. G., y Domínguez-Arias, R. M. (2008). "Efecto sobre la ingestión del fruto de xoconostle (*Opuntia joconostle*) sobre la glucosa y lípidos séricos", *Agrociencia*, 42(6), 645-653.
- PÉREZ-LOREDO, M., Hernández-de Jesús, L., y Barragán-Huerta, B. E. (2017). "Extracción de compuestos bioactivos de pitahaya roja (*Stenocereus stellatus*) aplicando pretratamientos con microondas, ultrasonido y enzimáticos", *Agrociencia*, 51(2), 135-151.
- PÉREZ-NEGRÓN, E., Dávila, P., y Casas, A. (2014). "Use of columnar cacti in the Tehuacán Valley, Mexico: perspectives for sustainable management of non-timber forest products", *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(1), 79.
- QUIROZ-GONZÁLEZ, B., García-Mateos, R., Corrales-García, J. J. E., y Colinas-León, M. T. (2018). "Pitahaya (*Stenocereus* spp.): an under-utilized fruit", *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 20, 82-100.
- RAMÍREZ-MORENO, E., Cariño-Cortés, R., Cruz-Cansino, N. D. S., Delgado-Olivares, L., Ariza-Ortega, J. A., Montañez-Izquierdo, V. Y., Hernández-Herrero, M. M., y Filardo-Kerstupp, T. (2017). "Antioxidant and antimicrobial properties of cactus pear (*Opuntia*) seed oils", *Journal of Food Quality*, 2017, 3075907.
- RAMÍREZ-RAMOS, M., García-Mateos, M. R., Corrales-García, J., Ybarra-Moncada, C., y Castillo-González, A. M. (2015). "Compuestos antioxidantes en variedades pigmentadas de tuna (*Opuntia* sp.)", *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(4), 349-357.
- RAMÍREZ-RODRÍGUEZ, Y., Martínez-Huélamo, M., Pedraza-Chaverri, J., Ramírez, V., Martínez-Tagüeña, N., y Trujillo, J. (2020). "Ethnobotanical, nutritional and medicinal properties of Mexican drylands Cactaceae fruits: recent findings and research opportunities", *Food Chemistry*, 312, 126073.

- SÁENZ, C. (2000). "Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes", *Journal of Arid Environments*, 46(3), 209-225.
- SÁNCHEZ, E., García, S., y Heredia, N. (2010). "Extracts of edible and medicinal plants damage membranes of *Vibrio cholerae*", *Applied and Environmental Microbiology*, 76(20), 6888-6894.
- DE SANTIAGO, E., Pereira-Caro, G., Moreno-Rojas, J. M., Cid, C., y de Peña, M. (2018). "Digestibility of (poly) phenols and antioxidant activity in raw and cooked cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*)", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(23), 5832-5844.
- SERRA, A.T., Poejo, J., Matías, A. A., Bronze, M. R., y Duarte, C. M. (2013). "Evaluation of *Opuntia* sderived products as antiproliferative agents in human colon cancer cell line (HT29)", *Food Research International*, 54 (1) 892-901.
- DE SILVEIRA AGOSTINI-COSTA, T. (2020). "Bioactive compounds and health benefits of *Pereskioideae* and *Cactoideae*: a review", *Food Chemistry*, 327,126961
- SIVAKUMAR, V., Anna, J. L., Vijayeeswarri J., y Swaminathan G. (2009). "Ultrasound assisted enhancement in natural dye extraction from beetroot for industrial applications and natural dyeing of leather", *Ultrasonics Sonochemistry*, 16(6), 782-789.
- SOTOMAYOR, A., Pitizaca, S., Sánchez, M., Burbano, A., Díaz, A., Nicolalde, J., Viera, W., Caicedo, C., y Vargas, Y. (2019). "Evaluación físico química de fruta de pitahaya *Selenicereus megalanthus* en diferentes estados de desarrollo", *Enfoque UTE*, 10(1), 89-96.
- SHREEKANTH, D., Arunasree, M. K., Roy, K. R., Reddy, T. C., Reddy, G. V., y Reddanna, P. (2007). "Betanin a betacyanin pigment purified from fruits of *Opuntia ficus-indica* induces apoptosis in human chronic myeloid leukemia Cell line-K562", *Phytomedicine*, 14(11), 739-746.
- STINTZING, F. C., Herbach, K. M., Mosshammer, M. R., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S., Akoh, C. C., Bunch, R., y Felker, P. (2005). "Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(2), 442-451.

- SUMAYA-MARTÍNEZ, M. T., Diéguez, T. S., Cansino, N. D. S. C., García, E. A., y Sampedro, J. G. (2010). "Innovación de productos de alto valor agregado a partir de la tuna mexicana", *Revista Mexicana de Agronegocios*, 27, 435-441.
- TILAHUN, Y., y Welegerima, G. (2018). "Pharmacological potential of cactus pear (*Opuntia ficus Indica*): a review", *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(3), 1360-1363.
- TORRES-PONCE, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. L., y Nevárez-Moorillón, G. V. (2015). "Nopal: semi-desert plant with applications in pharmaceuticals, food and animal nutrition", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1129-1142.
- VALENTE, L. M., de Paixão, D., Nascimento, A. C., dos Santos, P. F., Scheinvar, L. A., Moura, M. R. L., Tinoco, L. W., Gomes, L. N. F., y da Silva, J. F. M. (2010). "Antiradical activity, nutritional potential and flavonoids of the cladodes of *Opuntia monacantha* (Cactaceae)", *Food Chemistry*, 123(4), 1127-1131.
- VERONA-RUIZ, A., Urcia-Cerna, J., y Paucar-Menacho, L. (2020). "Pitahaya (*Hylocereus* spp.): cultivo, características fisicoquímicas, composición nutricional y compuestos bioactivos", *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 439-453.
- VILLALOBOS-CASTILLEJOS, F., Cerezal-Mezquita, P., Hernández De Jesús, M. L., y Barragán-Huerta, B. E. (2013). Production and stability of water-dispersible astaxanthin oleoresin from *Phaffia rhodozyma*. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 1243-1251.
- WAHDANINGSIH, S., Wahyuono, S., Riyanto, S., y Murwanti, R. (2020). "Terpenoid-lupeol of red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) and its immunomodulatory activity", *Pakistan Journal Pharmaceutical Science*, 33(2), 505-510.
- XU, L., Zhang, Y., y Wang, L. (2016). "Structure characteristics of a water-soluble polysaccharide purified from dragon fruit (*Hylocereus undatus*) pulp", *Carbohydrate Polymers*, 146, 224-230.
- YANG, B., Jiang, Y., Shi, J., Chen, J., y Ashraf, M. (2011). "Extraction and pharmacological properties of bioactive compounds from longan (*Dimocarpus longan* Lour.) fruit -A review", *Food Research International*, 44, 1837-1842.

CAPÍTULO 13
CASOS DE ÉXITO EN LA INDUSTRIA
ALIMENTARIA CON RECURSOS ORIGINARIOS
DE ZONAS ÁRIDAS DE MÉXICO

AARÓN FERNANDO GONZÁLEZ-CÓRDOVA

ADRIÁN HERNÁNDEZ-MENDOZA

BELINDA VALLEJO-CORDOBA

MANUEL VARGAS-ORTIZ¹

RESUMEN

Además de ser un país rico en recursos naturales, México cuenta con una gran diversidad cultural que promueve el consumo de dichos recursos. En algunos casos, los procesos agroindustriales han ayudado a potenciar el aprovechamiento de estos recursos para convertirse en productos insignias de México; tal es el caso del tequila y el mezcal. Sin embargo, es necesario destacar algunos otros recursos naturales de zonas áridas que también han sido beneficiados con la tecnología alimentaria. En este capítulo se hace un análisis de los casos de éxito en el procesamiento agroindustrial de recursos naturales endémicos de zonas áridas de México.

PALABRAS CLAVE: agave, comercializados, deshidratados, destilados, nopal, productos alimenticios.

¹ Todos: Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD, A.C.). Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Animal. Laboratorio de Calidad, Autenticidad y Trazabilidad de los Alimentos / Química y Biotecnología de Productos Lácteos. Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas, No. 46, col. La Victoria, CP. 83304, Hermosillo, Sonora. Autor de correspondencia: manuel.vargas@ciad.mx.

INTRODUCCIÓN

Alrededor del 28% del territorio mexicano es considerado ecosistema árido o semiárido, donde la precipitación pluvial media anual en promedio es menor a los 350 mm, entre 350 y 600 mm, respectivamente. En general, en ambos ecosistemas la precipitación promedio es menor a la cantidad de agua que se pierde por evaporación (Arámbula, 2005; Conafor, 2018) y la vegetación predominante está compuesta principalmente por plantas de tipo xerófilo (por ejemplo, mezquital, huizachal, pastizal y matorral), además de poseer una gran diversidad de especies animales (Conafor, 2009a). El gran potencial de aprovechamiento de las especies propias de estas zonas no ha sido la adecuada, ya que la falta de información y orientación de la población ha originado que muchos de los recursos sean explotados de manera irracional, basándose en la colecta desmedida de material silvestre, del cual no hay sistemas de renovación, cría o cultivo, lo que conduce al deterioro de la biodiversidad. Esto conlleva a problemáticas como la que presenta la biznaga (*Echinocactus platyacanthus*), cactus con el que se elabora el acitrón. Su explotación irracional y desmedida la han posicionado como una especie en peligro de extinción (Profepa, 2019).

Las zonas áridas de México se encuentran distribuidas principalmente en los estados de Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Sinaloa y Sonora, estados que se destacan entre los principales productores de trigo, cártamo, ajonjolí, garbanzo, sorgo, maíz, vid, nogal, tomate y sandía, entre otros productos alimenticios (Andrade-Bustamante *et al.*, 2017). En la actualidad, algunas variedades de agave y de nopal que son endémicas de estas zonas áridas de México han logrado ser explotadas e industrializadas, y aunque en un inicio hubo una sobreexplotación de algunos agaves, en la mayoría de los casos se generó un sistema de cultivo que ha permitido la producción y explotación de estos recursos de una manera más racional, lo cual potenció el desarrollo agroindustrial de estos productos, que se colocaron primero en el mercado local y posteriormente fueron distribuidos en los ámbitos nacional e internacional, lo que llevó a estos productos a ser casos de éxito comercial; un gran logro para productos endémicos de zonas áridas donde las condiciones climáticas limitan la producción. Las condiciones naturales de aridez de las

zonas áridas demandan mantener y cuidar los recursos propios de estas regiones, las cuales han contribuido a diversas actividades económicas, como minería, agricultura, ganadería e industria. Es importante señalar que, en gran parte, la generación de alimentos en México depende de las entidades del centro y norte del país, lo que supone el potencial agroalimentario de las zonas áridas y semiáridas. En el caso particular de la agricultura, se han adoptado estrategias para incrementar la productividad, donde destacan la cosecha de agua, el uso de semillas mejoradas, el monitoreo de condiciones de terreno, además de biotecnología aplicada a la generación de cultivos más resistentes y productivos (Sader, 2019a). En este capítulo se presentan casos de éxito comercial de bebidas y alimentos elaborados a partir de recursos endémicos de zonas áridas de México, para los cuales se han generado procesos industriales y que, por su gran aceptación, se han colocado en los diversos canales de comercio para cubrir supermercados, tiendas de autoservicio, tiendas departamentales, tiendas de conveniencia y algunas tiendas especializadas.

LOS AGAVES Y SUS DERIVADOS

Los agaves tienen su origen en México, donde se les conoce de manera genérica como magueyes. El género *Agave* cuenta con alrededor de 211 especies, de las cuales 159 (75% del total) se encuentran en territorio mexicano. Los agaves han sido utilizados desde épocas prehispánicas, y son valorados por los diversos usos que se les puede dar. Dependiendo de la variedad o del tipo de agave, se pueden utilizar para generar fibras, agujas, material de construcción, entre otras aplicaciones (UNAM, 2018; Ramírez, 2002). El desarrollo de bebidas alcohólicas ha acompañado a la historia del ser humano casi de igual forma que lo han hecho alimentos como el pan o la carne (Salazar, 2007). La mayoría de los agaves contienen compuestos susceptibles de ser fermentados y posteriormente destilados para la generación de bebidas. Algunos productos derivados de agave que han llegado a tomar importancia económica son el tequila, el mezcal, el bacanora y, en menor proporción, el pulque. Aunque los únicos que han llegado a producirse bajo un esquema industrial, estandarizado y regulado son el tequila, el bacanora y el mezcal.

De forma estricta, todas las bebidas que se generan mediante procesos de fermentación y destilación de cualquier variedad de agave deben ser consideradas como mezcales. Sin embargo, el motivo por el cual el tequila y el bacanora reciben estos nombres reside en mayor medida a la denominación de origen, alguna diferencia en las condiciones de proceso y, sobre todo, a la variedad de agave utilizado para su elaboración (Sader, 2019b). La producción de bebidas fermentadas era común en la población mexicana antes de la llegada de los españoles; no obstante, el proceso de destilación es una aportación de tecnología de los colonizadores, la cual permitió la diferenciación de estas bebidas alcohólicas (Salazar, 2004). La denominación de origen se asigna una vez que se ha comprobado que diversos factores agroclimáticos (temperatura, precipitación, suelo, luz etc.) y la constitución del agave afectan las propiedades del producto final; por ende, cada región producirá agaves diferenciados aun cuando sean de la misma variedad (Frisby *et al.*, 2018)

Bacanora

El bacanora es una bebida alcohólica que recibe su nombre en referencia a una población llamada precisamente Bacanora –en lengua opata, ‘ladera de los carrizos’, la cual se ubica dentro del denominado desierto de Sonora. Se dice que en esta población se producía esta bebida con la mejor calidad; por tanto, se decidió que tomaría su nombre (Sobarzo, 2006). La única especie con la que está autorizado producirlo es con el *Agave angustifolia* Haw o *Agave pacifica* Trel, siempre y cuando sea originario de alguno de los 35 municipios que cuentan con la denominación de origen de la zona montañosa del estado de Sonora (Frisby *et al.*, 2018). Como se mencionó antes, el rasgo más distintivo entre el tequila, el mezcal y el bacanora es la variedad de agave utilizado. La producción y comercio de bacanora está regida por la Norma Oficial Mexicana NOM-168-SC-TI-2004, la cual define el bacanora como una bebida alcohólica destilada, elaborada a partir de la fermentación alcohólica de azúcares previamente hidrolizados mediante la cocción y molienda de piñas de *Agave angustifolia* Haw. El bacanora es originalmente transparente, pero puede tornarse amarillento si se deja madurar en contenedores de madera. Es importante

resaltar que el proceso de elaboración del bacanora es más artesanal y menos tecnificado que el del tequila o mezcal. Esto puede deberse a que la producción de bacanora estuvo prohibida durante 77 años, por lo que el proceso de su elaboración se ha mantenido de manera rústica, prácticamente igual que hace trescientos años (Frisby *et al.*, 2018).

Uno de los rasgos más distintivos para producir el bacanora es que se usan en su mayoría agaves prácticamente silvestres, pues no se tiene un programa de fertilización o control de plagas, ni un cuidado del crecimiento de la planta, la cual requiere de alrededor de ocho años para ser utilizada en la producción de bacanora (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 2007). Desde el otorgamiento de la denominación de origen en el año 2000, sólo dos fábricas han logrado cumplir la normativa tanto sanitaria como la referente a la producción, envasado y comercialización de bacanora, y han logrado buscar un nicho en mercados extranjeros (Domínguez-Arista, 2020). La elaboración artesanal de bacanora se inicia con el despencado de la piña del agave, la cual se somete a cocción en hornos rústicos construidos mediante hoyos en la tierra, cuyas paredes se recubren de piedra volcánica.

Con el incremento de la temperatura, los fructooligosacáridos y la inulina se hidrolizan hasta fructosa (97%) y glucosa (3%), los cuales son llevados a fermentación (García *et al.*, 2007). Cuando la piña está cocida, se macera mediante diversos instrumentos y se coloca en barriles de madera para dejar que se fermente durante siete días a temperatura ambiente (Álvarez-Ainza *et al.*, 2009); esto puede contribuir a que el bacanora conserve un sabor dulce más acentuado, muy parecido al de la piña de agave recién cocida (Sader, 2019b).

Otro distintivo del proceso artesanal de elaboración de bacanora es que, para la etapa de fermentación, los productores no inoculan una cepa de levadura específica, sino usan las levaduras nativas presentes en el jugo extraído durante la molienda de las piñas. Estas levaduras pueden tener su origen en diversas fuentes, por ejemplo, el campo, los manipuladores del jugo, los utensilios de trabajo o las superficies de los lugares donde se realiza el proceso. Se ha demostrado que la mayor parte de la fermentación se lleva a cabo por *Saccharomyces cerevisiae*. Sin embargo, hay evidencia de que en la fermentación para la producción del bacanora participa un consorcio de levaduras con propiedades

fenotípicas y genotípicas muy diferentes entre sí, y es necesario que se definan cuáles son las cepas más importantes después de *Saccharomyces cerevisiae* (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 2007).

Los jugos fermentados se pasan a un destilador rustico que consiste en un recipiente metálico con una mezcla de piedra y barro como aislante exterior, la cual conserva bien el calor generado por la combustión de leña de mezquite. En la parte superior, se coloca un tipo de embudo invertido con un pistilo largo, el cual es enfriado por agua, y conduce a la condensación de los vapores destilados, los cuales son destilados por segunda vez en ausencia del macerado de la piña (Bujake, 1992; Gutiérrez-Coronado *et al.*, 2007). El contenido de alcohol de los destilados puede oscilar entre 20 y 30%, aunque siempre hay una gran variabilidad en los compuestos aromáticos del bacanora, debido posiblemente a la utilización de agaves silvestres procedentes de diferentes entornos agroclimáticos, que generan diferentes compuestos (Álvarez-Ainza *et al.*, 2013).

Por su alto contenido de alcohol, la norma oficial mexicana NOM-168-SCTI-2004 establece que todas las presentaciones comerciales de bacanora deben ajustar su volumen de alcohol (entre 40 y 50% v/v) mediante la adición de agua. Normalmente, los destilados de bacanora son transparentes y cristalinos, pero si se dejan reposar (como mínimo dos meses) o añejar (por lo menos doce meses) en recipientes de madera de roble o encino, toman coloraciones rojizas (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 2007). Se estima que en 2018 se generaron alrededor de 300 000 litros de bacanora (Sader, 2019b).

Mezcal

En referencia al nivel de desarrollo tecnológico, el mezcal está en un punto intermedio en su proceso de elaboración. Existe una disyuntiva entre los productores que quieren conservar el proceso tradicional, mientras que el Consejo Mexicano Regulador del Mezcal se concentra en impulsar sólo a aquellos productores que puedan adoptar un sistema de industrialización empresarial y cambiar el proceso artesanal (Bautista *et al.*, 2015). Ante la disyuntiva entre conservar el proceso artesanal o adoptar un sistema industrializado, no se tiene definido un proceso

unificado que aplique en todas las empresas productoras de mezcal, aunque se ha comprobado que cada región mezcalera puede tener una variante en el proceso de elaboración (Antonio *et al.*, 2015; Bautista *et al.*, 2015; Kirchmayr *et al.*, 2017).

De manera general, se puede resumir en la siguiente secuencia: 1) colecta de las piñas con aproximadamente ocho años de antigüedad; 2) horneado de las piñas; 3) molienda de las piñas horneadas; 4) fermentación de piñas molidas; 5) destilación; 6) reposado o añejamiento (Molina-Guerrero *et al.*, 2007; Bautista *et al.*, 2015).

Cuando se realiza la cosecha de las piñas de agave, antes de separar la piña de la raíz, se realiza la actividad conocida como jima, la cual consiste en eliminar las hojas de la piña. Una vez que la piña queda sin hojas, se le conoce como piña jimada, y entonces se corta de la raíz (Gschaedler *et al.*, 2008). Esta actividad tiene el propósito de reducir el peso de la materia prima, ya que cuando la colecta es de material silvestre, no siempre se puede llegar en vehículo hasta el lugar de la colecta. Cabe mencionar que esta actividad es común tanto en la producción de bacanora como en la del tequila. Posteriormente, las piñas jimadas partidas a la mitad son sometidas al horneado, el cual por lo regular se realiza en huecos cavados en la tierra (algunos de ellos con capacidad de hasta treinta toneladas de piñas) y recubiertos de piedra. Los hornos se llenan de leña y es quemada durante varias horas (entre cuatro y ocho horas, dependiendo del tamaño del horno) hasta que las paredes de piedra alcanzan temperaturas de alrededor de 400°C. Cuando la leña termina de quemarse, las piñas se colocan en el interior del horno (quizá por esta razón el mezcal registra un ligero sabor ahumado) hasta cubrir su capacidad; en la parte superior, se colocan diversos materiales vegetales (hojas y ramas de diversas plantas) y tierra para formar una especie de tapadera que impide que se pierda el calor, y se dejan horneando durante tres o diez días, dependiendo del tamaño del horno; lo anterior, para el proceso artesanal.

Por el contrario, en el proceso industrial, el horneado se realiza en autoclaves que regulan la temperatura y tiempo de cocción de acuerdo con el volumen manejado. Durante el horneado de las piñas, se hidrolizan los fructanos y se obtienen altas concentraciones de fructuosa (Molina-Guerrero *et al.*, 2007; Gschaedler *et al.*, 2008; Bautista *et al.*, 2015). Las piñas horneadas son molidas para promover la liberación de

los jugos ricos en fructosa, la molienda se realiza de diversas maneras dependiendo del nivel de tecnificación de la empresa; en los más rústicos, la molienda puede ser a mano mediante el uso de mazos de madera; en otros casos, se emplean grandes molinos de piedra accionados por animales, mientras que en los más tecnificados, la molienda se realiza mediante molinos mecánicos y posteriormente prensado (Gschaedler *et al.*, 2008; Antonio *et al.*, 2015).

El resultado de la molienda de las piñas se coloca normalmente en tinajas grandes de madera, concreto, plástico o metal, dependiendo del nivel de tecnificación y de la región productora, las cuales se llenan hasta $\frac{3}{4}$ de su capacidad; el resto se completa con agua caliente (en los procesos rústicos se usa agua de pozos, mientras que en los tecnificados se usa agua destilada). La mezcla se deja fermentar a temperatura ambiente hasta por ocho días, dependiendo de las condiciones climáticas. En los procesos artesanales, se deja actuar a los microorganismos nativos presentes en las propias instalaciones, utensilios y medioambiente circundante, mientras que en los procesos más tecnificados se agregan cepas de levaduras específicas.

Se tiene registro de 625 empresas que producen mezcal, distribuidas en 9 estados de la república mexicana (Durango, San Luis Potosí, Guerrero, Zacatecas, Oaxaca, Guanajuato, Tamaulipas, Michoacán, Puebla), de las cuales sólo 296 están certificadas con la norma oficial NOM-070-SCFI-2016, referente a bebidas alcohólicas-mezcal-especificaciones, que regula la producción, envase y comercio del mezcal, y además deben cumplir las normas sanitarias. Sin embargo, sólo existen 103 marcas que comercian el mezcal (CNSPMM, 2012), principalmente en tiendas especializadas en vinos y licores, tiendas de autoservicio y como recuerdos (*souvenir*) en puntos de venta con afluencia de turistas. El resto de las empresas son informales y elaboran el mezcal de manera más artesanal y no cubren los requisitos para colocar sus productos en mercados nacionales e internacionales (Gaytán, 2018), por lo que su mayor venta es en el ámbito local, y sus principales clientes son los turistas que visitan el lugar.

La NOM-070-SCFI-2016 establece que para la elaboración de mezcal es válido utilizar diferentes variedades de agaves, siendo el *Agave angustifolia*, *Agave esperriana*, *Agave potatorum*, *Agave salmiana* y *Agave weberi* los más utilizados en la práctica. Esto se debe a que la denominación de

origen se otorgó a regiones de nueve estados (Guerrero, Puebla, Michoacán, Zacatecas, Durango, Tamaulipas, San Luis Potosí y Guanajuato), donde la materia prima es silvestre en su mayor parte y los productores originalmente no hacían distinción entre variedades, lo que lo hace por completo diferente al bacanora o al tequila, además de algunos aspectos en su proceso de elaboración.

Algunas investigaciones han demostrado que en los procesos rústicos las bacterias ácido lácticas representan el grupo mayoritario, seguidas por levaduras, principalmente *Clavispora lusitaniae*, *Kluyveromyces marxianus* y *Pichia fermentans*. Aunado a esto, también se ha demostrado que las cepas difieren en cada región mezcalera. En el plano industrial, los microorganismos más utilizados como inóculo suelen ser del género *Saccharomyces* (Molina-Guerrero *et al.*, 2007; Gschaedler *et al.*, 2008; Bautista *et al.*, 2015; Kirchmayr *et al.*, 2017).

La etapa de destilado consiste en calentar el mosto fermentado para posteriormente condensar los vapores alcohólicos; los sistemas de destilado en las diferentes regiones mezcateras varían mucho, e incluso entre empresas de una misma región mezcateras. Los equipos utilizados son muy diversos tanto en su forma como en el material utilizado, incluyendo el uso de materiales como madera, metal, plástico o barro; además, la configuración de las fuentes de calor y los sistemas de refrigeración son extremadamente variados; lo único que parece ser común en casi todos los sistemas, es la utilización de cobre como material predominante en los sistemas de calentamiento y refrigeración. La temperatura promedio para la destilación es de 250°C, y el mosto se cambia cuando el destilado tiene menos de diez grados de alcohol; en algunas empresas se realiza una segunda destilación, pero no es obligatoria. El producto final tiene entre 6 y 10% (v/v) de etanol (Molina-Guerrero *et al.*, 2007; Gschaedler *et al.*, 2008; Bautista *et al.*, 2015).

Para determinar la concentración de alcohol en el producto final, las empresas rústicas usan instrumentos elaborados de madera y carrizo con orificios que permiten el fluir del líquido y la formación de burbujas; en función de la apariencia de estas burbujas, se estima si la concentración de alcohol es adecuada. En contraste, las empresas tecnificadas realizan la determinación mediante un alcoholímetro de mercurio (Bautista *et al.*, 2015). En empresas tradicionales, el reposado o añejamiento se

realiza en contenedores de madera, mientras que en las empresas más industrializadas se usan contenedores de metal o plástico. Las empresas rústicas conservan las recetas de elaboración de mezcal transmitidas de generación en generación, en tanto que en las industrias más tecnificadas se evalúa la adición de ingredientes o modificación de condiciones de operación (Bautista *et al.*, 2015). En 2018 la producción de mezcal certificado fue de 5.9 millones de litros (Sader, 2019b).

Tequila

Cuando se habla de la producción de destilados de agave, la elaboración del tequila es el proceso más tecnificado y estandarizado. Para este proceso, la normativa, tanto oficial como la de denominación de origen, marca que el tequila sólo se puede elaborar utilizando agave azul (*Agave tequilana* F.A.C. Weber “azul”). Además de las propiedades sensoriales que le otorga al tequila, el agave azul alcanza su madurez en menos tiempo y presenta una concentración de azúcar (alrededor de 75% de carbohidratos, siendo glucosa, dextrinas, almidón e inulina las más abundantes) superior que otras variedades (Arrazola, 1969; Gentry; 1982). De manera tradicional se asocia al tequila con el estado de Jalisco, en México. No obstante, la denominación de origen de tequila ha sido otorgada a cinco estados: Jalisco, Guanajuato, Michoacán, Nayarit y Tamaulipas, en donde el sistema de producción se ha estandarizado. Una de las primeras modificaciones fue la utilización de hornos de mampostería y el diseño de alambiques para la destilación, lo que hizo el proceso más eficiente e incrementó el volumen de producción y la calidad del producto final, para destacarse de otros destilados de agave (Gaytán, 2014; Bowen, 2015). La tecnificación del proceso de producción de tequila impactó la producción en el campo, ya que se inició el establecimiento de cultivo de agave azul debido a que cada vez se requería mayor cantidad de materia prima, la cual no se cubría con la colecta de piñas silvestres.

El proceso de elaboración de tequila se inicia con la cosecha de piñas de agave de entre ocho y diez años, a las cuales se les eliminan las hojas y se les cuantifica el contenido de azúcares reductores; esto, con el fin de darles un proceso de cocción acorde a su contenido de azúcares

(fructosa y glucosa), ya que, a diferencia de la elaboración de mezcal o bacanora, esto se considera como un indicador de calidad, el cual puede influir en el precio de las piñas (i.e., entre más azúcar contengan, mayor será el precio) (Pinal *et al.*, 1997; Téllez, 1998). Una vez que se conoce el contenido de azúcares, las piñas se someten al proceso de horneado o cocción, el cual se puede llevar a cabo de forma tradicional en hornos hechos de cemento (entre 28 y 48 horas), o bien en autoclaves, donde el tiempo requerido se reduce prácticamente a la mitad (12 a 24 horas).

Al igual que en los otros procesos, en esta etapa los azúcares complejos se hidrolizan a azúcares fermentables (fructosa y glucosa principalmente), además de ablandar las piñas para el molido (Bautista-Justo *et al.*, 2001; Prado-Jaramillo *et al.*, 2015; Ramírez-Guzmán *et al.*, 2019). Después de la cocción, las piñas se muelen y se prensan para la extracción del jugo. Para esta operación siempre se usan molinos y prensas, las cuales pueden variar en las diferentes empresas productoras, pero siempre se recurre a la fuerza mecánica. Después del prensado, la parte sólida es desechada y sólo se usa el jugo extraído (Bautista-Justo *et al.*, 2001; Prado-Jaramillo *et al.*, 2015; Ramírez-Guzmán *et al.*, 2019). A diferencia del bacanora y el mezcal, la fermentación para el tequila es una etapa crítica que define la calidad final del producto, y por esta razón es una etapa controlada. La norma oficial NOM-006-SCFI-2012 permite la adición de hasta 49 g de azúcar por cada 100 g de azúcares totales en el mosto antes del fermentado. En este sentido, la fermentación se puede realizar sin la adición de azúcar (cuando se habla de 100% agave, la concentración de azúcar se ajusta después de la fermentación), o bien con adición de azúcar cuando se habla de tequila.

Durante la etapa de fermentación en el proceso tradicional, se utilizan los microorganismos nativos presentes, mientras que en procesos industrializados el mosto es primeramente esterilizado y posteriormente se añade una fuente de nitrógeno y un inóculo de *Saccharomyces cerevisiae*. En ambos casos, la fermentación también se realiza en condiciones controladas, generalmente entre 25 y 30°C durante dos o siete días, dependiendo del contenido de azúcares y de la formación de etanol (Téllez-Mora *et al.*, 2012; Prado-Jaramillo *et al.*, 2015). Después de la fermentación, se da lugar a la destilación, la cual se realiza en dos etapas. La primera tiene el propósito de separar por completo la parte líquida,

dejando como residuo, únicamente sólidos como los microorganismos, minerales y restos de tejido vegetal que no pudieron ser separados durante el prensado. También se eliminan compuestos como el agua y el metanol (que se genera por desmetilación de las pectinas presentes en la fibra de agave); al final de esta etapa, el destilado alcanza una graduación de 25 a 30 unidades de volumen de alcohol por cada 100 unidades de volumen de producto final.

La segunda etapa de destilado, también conocida como rectificación, tiene como propósito concentrar el volumen de etanol, llegando hasta 45 o 50 unidades de volumen de etanol por cada 100 unidades de volumen de producto final. La destilación se realiza en alambiques o en torres de destilación dependiendo de la configuración que cada empresa adopte. Cuando el destilado se envasa, inmediatamente después de la destilación, se conoce como tequila blanco (un líquido incoloro transparente). Si el destilado se pasa al proceso de añejamiento, éste debe realizarse en contacto directo con la madera de barricas hechas de roble o encino, un mínimo de dos meses para un tequila reposado, un año para el tequila añejo y tres años para el tequila extra añejo (Bautista-Justo *et al.*, 2001; Ramírez-Guzmán *et al.*, 2019; CRT, 2021).

Actualmente, el tequila se exporta a 120 países, siendo Estados Unidos el principal importador. El auge económico del tequila y la exportación impulsaron al incremento de la productividad mediante la aplicación de sistemas industrializados y estandarizados que dejaron de lado los procesos artesanales; para algunos, este cambio demeritó la calidad y la identidad original del tequila (Herrera-Pérez *et al.*, 2018; Romo, 2018).

NOPAL Y SUS DERIVADOS

México es el país con mayor biodiversidad de especies endémicas de zonas áridas; dentro de estas especies, se encuentra el nopal (*Opuntia ficus-indica*), el cual es una de las plantas insignia de México. De esta planta se aprovechan, para consumo humano, sus cladodios tiernos (nopalitos), sus frutos y sus flores (Reyes-Agüero *et al.*, 2005; Peña-Valdivia *et al.*, 2012). Sin embargo, la parte que ha tenido mayor éxito comercial son sus tallos,

para los cuales existe todo un sistema productivo. Para el cultivo de nopal verdura se recomiendan variedades sin espina, como las variedades Copena V1, Copena F1, Villanueva, Milpa Alta o Italiano e Imperial (Sagarpa, 2014). La norma mexicana NMX-FF-068-SCFI-2006 rige la clasificación del nopal de acuerdo con su calidad, tamaño y variedad; además, la normativa internacional (Codex Alimentarius, 2007) regula principalmente que el nopal esté libre de daños aparentes causados por factores mecánicos, microbiológicos o climáticos, además de otros parámetros de calidad, como color, olor y sabor característicos. Las regulaciones nacionales e internacionales han permitido que el nopal se exporte a países como Estados Unidos y Canadá. A diferencia de lo que pasa con otros productos originarios de México (como el maíz), México sigue siendo el principal consumidor y productor de nopal en el mundo (en México, el consumo per cápita de nopal, es de alrededor de 6.4 kg, se producen 891 000 toneladas de este producto al año y se exportan 55 000 toneladas anuales), ya que constituye parte importante de la dieta de su población (Sader, 2020). En el país se le vende en prácticamente todos los centros comerciales de autoservicio. Además, algunas empresas desarrolladoras de alimentos han logrado éxito comercial con productos derivados de nopal o que al menos contengan 30% de nopal. Este éxito comercial fue impulsado por su alto contenido de fibra y pectina, los cuales pueden contribuir a mejorar el estado de salud del consumidor (Torres-Ponce *et al.*, 2015).

Tortillas de nopal

El incremento de enfermedades como la diabetes ha causado que parte de la población mexicana haya reflexionado sobre la calidad de lo que consume. Las recomendaciones médicas para reducir estas enfermedades crónico-degenerativas incluyen la reducción del consumo de ciertos alimentos, entre ellos la tortilla, por considerarla una de las vías de ingesta de carbohidratos más común. Esto dio cabida al desarrollo de tortillas formuladas con diferentes ingredientes, con la finalidad de reducir su aporte calórico o bien para mejorar su calidad nutricional. En el mercado nacional existe una línea de tortillas elaborados con nopal, las cuales son un claro ejemplo de éxito comercial. Éstas se distribuyen actualmente en la mayoría de las

tiendas de autoservicio y tiendas de conveniencia. Las tortillas de nopal son una mezcla de harina de maíz nixtamalizado con pulpa de nopal, que puede representar entre 40 y 50% del total de la mezcla final. Además, contienen algunos conservadores y gomas que permiten la cohesión entre los componentes (A Tu Salud, 2021; Gamíz, 2021). Algunas marcas han diversificado las tortillas con nopal y las han vuelto tostadas, para lo cual someten a las tortillas con nopal a procesos de deshidratado para modificar la textura y distribuirla como una tostada. Por otra parte, también han incorporado ingredientes categorizados como saludables, como en el caso de las tortillas elaboradas con nopal y linaza; algunos estudios sugieren que la adición de un 10% de harina de nopal en sustitución de la harina de maíz en la elaboración de tortillas promueve una reducción considerable en los niveles de glucosa en sangre (Chávez, 2015).

Churritos de nopal

Muchas culturas en todo el mundo acostumbran el consumo de botanas, las cuales también han visto afectada su reputación debido a su relación con enfermedades causadas por malos hábitos alimenticios. Esto ha dado a lugar a la elaboración de botanas con carácter saludable, producidas principalmente con nopal (cladodio) como ingrediente. Estos churritos son elaborados con una mezcla de harina de maíz nixtamalizado y pulpa de nopal fresco, además de aceite vegetal, condimentos, saborizantes, sal, espesantes, emulsificantes y conservadores; en la mezcla, el nopal representa un 38% del total (A Tu Salud, 2021).

Los churritos normalmente se generan mediante el proceso de extrusión, procedimiento en el que un material, en este caso la mezcla de ingredientes de los churritos, se hace fluir por un conducto o canal bajo condiciones de presión y temperatura que promueven cambios físicos y químicos en la mezcla (principalmente, la reducción de la humedad, modificación de la estructura de proteínas y almidón, incremento de volumen del producto, cambio de la textura). Al producto semiterminado se le adicionan colorantes o saborizantes. Los cambios en la mezcla son principalmente estructurales, y dependiendo de la temperatura de operación pueden conducir a la reducción de la humedad o bien a la

cocción del producto. Otra característica del proceso de extrusión es que normalmente el producto final adquiere la forma del conducto por el cual es forzado a fluir; en otros casos, el producto se expande al salir del conducto y adquiere una forma cilíndrica con textura esponjosa por la incorporación de aire (Alam *et al.*, 2016; Riaz, 2019; Prabha *et al.*, 2021).

A pesar de que inicialmente los churritos de nopal fueron presentados como una opción saludable, en algunos casos los ingredientes utilizados para su elaboración exceden los límites de consumo recomendados, por lo que los productos han sido reetiquetados (por exceder los límites de calorías y sodio establecidos) en su empaque con base en la NOM 051- SCFI/SSA1-2010, la cual regula las especificaciones de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados, así como la información comercial y sanitaria (NOM 051- SCFI/SSA1-2010).

La población mexicana tiene como hábito mezclar alimentos con picante, limón y sal, desde frutos, verduras, cárnicos, mariscos hasta insectos, así que la utilización de estos ingredientes en la elaboración de botanas es recurrente. Los churritos elaborados a partir de la mezcla de harina de maíz con pulpa de nopal no han sido la excepción, y se comercializan en presentaciones con sabor sal y limón, chipotle y habanero, haciendo referencia a los saborizantes añadidos. Los churritos elaborados con nopal son presentados como productos bajos en grasa, altos en fibra, libres de colesterol y buena fuente de calcio (A Tu Salud, 2021). Estas botanas se han convertido en un éxito comercial, son distribuidas en empaques que se ajustan a las normativas y comercializadas en todos los estados de México en tiendas de autoservicio, clubes, tiendas de conveniencia, tiendas departamentales y venta en línea (A Tu Salud, 2021), a pesar de la existencia de una vasta gama de competidores que tienen más años en el mercado.

Nopal deshidratado

Al igual que la mayoría de los vegetales, el nopal está constituido en su mayoría por agua (alrededor del 95%), seguida por los carbohidratos (3%), proteínas (cerca del 1.32%) y cenizas (1%) (Loayza y Chávez, 2007). El alto contenido de humedad propicia la susceptibilidad de deterioro

por microorganismos, además de permitir la continuidad del deterioro biológico de los tejidos; por esta razón, se ha optado por desarrollar productos deshidratados. Un producto a base nopal que también ha resultado un éxito comercial son los nopales deshidratados y saborizados; en este caso, los nopales son sometidos a deshidratación osmótica con soluciones altas en azúcar (A Tu Salud, 2021). Este proceso de deshidratado les confiere a los nopales una textura y sabor que no es posible generar mediante otro tipo de proceso. La deshidratación osmótica es un medio de conservación de alimentos cuyo principal objetivo es reducir el contenido de humedad hasta 50-60% del contenido original.

El proceso consiste en poner en contacto el vegetal con una solución saturada de azúcar, lo que provoca una transferencia de agua del vegetal hacia la solución y una migración de solutos (azúcar) de la solución hacia el vegetal, lo cual cambia el sabor, la textura y la composición del vegetal (Spiazzi y Mascheroni, 2001). Como consecuencia de este proceso, el contenido de azúcares del producto final se incrementa y puede exceder el nivel de consumo recomendado. Sin embargo, las propiedades organolépticas de textura y sabor del producto final probablemente no se podrían generar mediante otro tipo de secado. El éxito comercial de este producto recae sobre todo en su sabor y textura, pues resulta de gran agrado al consumidor cuya intención de compra casi siempre está dominada por su percepción sensorial.

El producto se presenta con recomendaciones de consumo en relación con su nivel de azúcares, pero también debido a sus ingredientes se le presenta como una buena fuente de fibra, libre de colesterol y libre de grasas trans (A Tu Salud, 2021). En este caso, los nopales deshidratados son adicionados con picante que, combinado con el azúcar, dan un agradable sabor. El producto se vende en diferentes cadenas de supermercados, tiendas departamentales y tiendas de conveniencia, con todas las normativas sanitarias y de etiquetado.

Harina de nopal

El comercio de harina de nopal no tiene tanta demanda como las tortillas o las botanas; sin embargo, se ha abierto camino aprovechando los

impulsos de las dietas especializadas. La harina de nopal se vende principalmente en tiendas de autoservicio, tiendas departamentales y tiendas especializadas que cubren nichos de mercado reducidos. Por su menor demanda, la harina de nopal no llega a venderse en tiendas de conveniencia. Para la obtención de harina, a los cladodios se les retiran las espinas y son lavados con agua clorada (120 PPM de cloro), posteriormente son cortados en tiras de un centímetro de ancho, colocadas en secadores de aire caliente (60° C / 12 h) hasta peso constante, luego son molidos y tamizados a través de tamices de malla #45, 80 y 120 (De Farias *et al.*, 2021). No existe una normatividad referente a las especificaciones que debe cubrir la calidad o composición de la harina de nopal (Castillo *et al.*, 2013). La falta de una normativa causa una gran variación en las características de la harina procesada por cada empresa que se dedica a la producción y venta de harina de nopal. Valdría la pena establecer la normativa específica para este producto.

Nopal precortado y congelado

Los nopales (desinfectados mediante remojo en agua clorada, 120 PPM de cloro durante diez minutos) que no cubren la calidad para ofrecerse en fresco son utilizados para venderse como verdura precortada (en cubos, tiras o simplemente sin espinas ni orillas) que puede ser distribuida en fresco o bien puede ser congelada y empacada en bolsas plásticas. El nopal precortado es una alternativa de venta en muchas cadenas de supermercados que ofrece la practicidad de tener el producto casi listo para su consumo. Por otra parte, la presentación en cubos congelados permite incrementar la vida de anaquel. Estos productos normalmente se venden cubriendo las normas de calidad microbiológica (NOM-092-SSA1-1994; NOM-110-SSA1-1994; NOM-112-SSA1-1994 y NOM-113-SSA1-1994) y de etiquetado (NOM-051-SCFI/SSA1-2010) en sus empaques. En este caso, los productos no se distribuyen en tiendas departamentales ni en tiendas de conveniencia, pero no pueden faltar en todas las cadenas de supermercados y tiendas de autoservicio.

CHILTEPÍN

El chiltepín, cuyo nombre científico es *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*, es originario de zonas áridas y semiáridas de México y el sureste de Estados Unidos. En México recibe distintos nombres dependiendo la región donde se encuentre; por ejemplo, en Nuevo León recibe el nombre de chile piquín (Conafor, 2009b). Es tradicional su empleo para la elaboración de salsas picantes en las regiones donde se recolecta de manera silvestre. Sin embargo, algunas empresas que ya elaboraban salsas con otros tipos de chiles lo tomaron para desarrollar una salsa que en la actualidad se distribuye en todo México en centros comerciales de autoservicio y tiendas de conveniencia, además de tiendas de abarrotes en diferentes localidades. Para el proceso artesanal mediante el que se elabora la salsa a base de chiltepín, se utiliza chiltepín de color rojo, el cual se mezcla con especias y condimentos; además, se agrega ácido acético, lo que genera un pH de entre 2.7 y 5.1. La mezcla se homogeniza hasta licuar mediante una molienda en húmedo a temperatura ambiente, sin aplicación de procesos térmicos en ningún momento (Montoya-Ballesteros *et al.*, 2010). Debido a que la cultura mexicana tiene un gran arraigo en el consumo de picante, el desarrollo de estas salsas cuyo componente principal es el chiltepín ha motivado el incremento de la producción, ya que su explotación industrial ha generado problemas de abastecimiento para la industria. El Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste ha identificado que el principal problema para generar una mayor diversidad de productos derivados de chiltepín es la escasa tecnificación de su cultivo, además de la falta de organización social para la creación de empresas locales en las zonas productoras (Conacyt, 2021). A pesar de esto, las salsas de chiltepín pueden considerarse un éxito comercial, aunque el desabasto de la materia prima puede llevar al uso de sustitutos como saborizantes no naturales o bien usar otra especie de chile y que, a causa de la formulación industrial, este cambio no sea perceptible fácilmente.

ORÉGANO

El orégano mexicano es originario de zonas áridas, principalmente de los estados de Coahuila, Chihuahua y Sonora. Su nombre científico es *Lippia graveolens*; su uso principal es como condimento para la elaboración de distintos platillos, pero tiene propiedades medicinales que aprovecha la industria farmacéutica. Por lo regular se usan sus hojas deshidratadas o molidas, las cuales son un excelente potenciador del sabor de muchos platillos típicos de México. Además, se le han atribuido propiedades como conservador de alimentos, quizá con actividad antifúngica y antimicrobiana. Por otra parte, debido a su alto contenido de antioxidantes, se usa en productos alimenticios procesados a base de diferentes pescados, además de ser empleado en la industria de bebidas para fijar aromas (Conafor, 2009b). Su venta se realiza en diversas presentaciones, desde en sobres de papel hasta en contenedores de plástico o vidrio, y está presente en los anaqueles de centros comerciales de auto-servicio y tiendas de conveniencia, además de tiendas de las localidades de todo México.

CONCLUSIONES

Los recursos naturales de zonas áridas son en extremo valiosos, y la explotación de éstos se ha basado principalmente en la transmisión de conocimientos de generación en generación. Las condiciones climáticas de las zonas áridas fueron una limitante para la domesticación de plantas o animales endémicas de estas zonas, por lo que originalmente se utilizaban sistemas de recolección de material silvestre, sin tomar en cuenta ciclos de vida, manejo de cultivo, etc., lo que ha limitado su conservación y reproducción. Por otra parte, el uso de la tierra para cultivo y cría de especies no endémicas de zonas áridas ha reducido la importancia de las especies de estas zonas, lo que da como resultado una escasa cantidad de especies cultivadas con fines alimenticios, que a su vez se traduce en una limitada lista de productos alimenticios desarrollados a partir de especies endémicas de zonas áridas de México. Sin embargo, ha sido el avance de la agronomía y la tecnología de alimentos

los que han permitido el establecimiento de sistemas de reproducción y transformación de recursos propios de zonas áridas. Es necesario destacar que todos los productos que han logrado un éxito comercial son de origen vegetal. Se deben generar programas sociales, educativos y comerciales que permitan revalorar los recursos de zonas áridas para el desarrollo de agroindustrias que puedan competir por espacios en los diferentes nichos de mercado. Valdría la pena también la búsqueda de domesticación de recursos de origen animal, como vía de conservación de las especies y como fuente de alimento.

REFERENCIAS

- A tu salud (2021). "ChurrITOS". <https://nopalia.mx/churrITOS/>.
- ALAM, M. S., Kaur, J., Khaira, H., y Gupta, K. (2016). "Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 445-473.
- ÁLVAREZ-AINZA, M. L., González-Ríos, H., González-León, A., Ojeda-Contreras, J., Valenzuela-Quintanar, A. I., y Acedo-Félix, E. (2013). "Quantification of mayor volatile compounds from artisanal agave distilled: bacanora", *American Journal of Analytical Chemistry*, 4(11), 683.
- ÁLVAREZ-AINZA, M. L., Zamora-Quiñonez, K. A., y Acedo-Félix, E. (2009). "Perspectivas para el uso de levaduras nativas durante la elaboración de bacanora", *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 51(1-2), 58-63.
- ANDRADE-BUSTAMANTE, G., García-López, A. M., Cervantes-Díaz, L., Aíl-Catzim, C. E., Borboa-Flores, J., y Rueda-Puente, E. O. (2017). "Estudio del potencial biocontrolador de las plantas autóctonas de la zona árida del noroeste de México: control de fitopatógenos", *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 49(1), 127-142.
- ANTONIO, J., Ramírez, J., y Smit, M. (2015). "Origen, auge y crisis de la agroindustria del mezcal en Oaxaca", en R. Fernández y J. L. Vera (eds.), *Destilados mexicanos de agave, mezcal, tequila y otros aguardientes hermanos*. México: INAH, 109-121.

- ARÁMBULA, L. T. (2005). “Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México”, *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(2), 17-21.
- ARRAZOLA, D. F. de M. (1969). “Estudio del contenido de azúcares en la piña del *Agave tequilana*”, tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Química.
- BAUTISTA, J. A., Orozco Cirilo, S., y Terán Melchor, E. (2015). “La disminución de la producción artesanal de mezcal en la región del mezcal de Oaxaca, México”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(6), 1291-1305.
- BAUTISTA-JUSTO, M., García-Oropeza, L., Corona, J. B., y Parra-Negrete, L. A. (2001). “El *Agave tequilana* Weber y la producción de tequila”, *Acta Universitaria*, 11(2), 26-34.
- BOWEN, S. (2015). *Divided spirits: tequila, mezcal, and the politics of production*. Berkeley: University of California Press.
- BUJAKE, J. E. (1992). “Beverage spirits, distilled”, en Kirk-Othmer Encyclopedia Of Chemical Technology, 4th. Edition, Volume No. 4, John Wiley & Sons, Inc. New York. 88-99.
- CASTILLO, S. F., Estrada, L., Margalef, M. I., y Toffoli, S. (2013). “Obtención de harina de nopal y formulación de alfajores de alto contenido en fibra”, *Diaeta*, 20-26.
- CHÁVEZ, G. J. L. (2015). “Estudios in vivo para evaluar el efecto fisiológico de la ingesta de tortilla de maíz adicionada con harina de nopal”, tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/2016/FQFB-M-2015-0727.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- CNSPMM (Comité Nacional Sistema Producto Magüey Mezcal) (2012). *Integración de la cadena productiva magüey mezcal de México. Durango, Guerrero, Oaxaca, Tamaulipas, Guanajuato, San Luis Potosí y Zacatecas. Plan Anual de Fortalecimiento 2012. Programa de Desarrollo de Capacidades, Innovación, Tecnología y Extensionismo Rural. Componente: Apoyo para la integración de proyectos. Oaxaca.*
- Codex Alimentarius (2007). “Codex Stan 185-1993. Fresh fruits and vegetables. ROMA: OMS / FAO.

- CONACYT (2021). “Producción de chiltepín, una alternativa de desarrollo para comunidades rurales”. México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. <https://centrosconacyt.mx/objeto/produccion-chiltepin/>.
- CONAFOR (2018). “El valor de la tierra”. México: Comisión Nacional Forestal. <https://www.gob.mx/conafor/articulos/el-valor-de-la-tierra?idiom=es>
- CONAFOR (2009a). “La aridez y sus regalos naturales”. México: Comisión Nacional Forestal. <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/La-Aridez-y-sus-regalos-naturales.pdf>.
- CONAFOR (2009b). “Catálogo de recursos forestales maderables y no maderables árido, tropical y templado”. México: Comisión Nacional Forestal. <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=215>.
- CRT (2021). “Proceso de elaboración de tequila”. México: Consejo Regulador del Tequila. <https://www.crt.org.mx/index.php/es/el-tequila-3/elaboracion-normativa/63-proceso-de-elaboracion-de-tequila>.
- Diario Oficial de la Federación (2004). “Norma Oficial Mexicana NOM-168-SCTI-2004. Bebidas alcohólicas. Bacanora. Especificaciones de elaboración, envasado y etiquetado”. México: Secretaría de Gobernación. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4917328&fecha=14/12/2005.
- DOMÍNGUEZ-ARISTA, D. R. (2020). “Bacanora, el mezcal de Sonora: de la clandestinidad a la denominación de origen”, *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 30, 56.
- FARIAS, P. M. de, de Vasconcelos, L. B., Ferreira, M. E., Pascall, M., y Tapia-Blácido, D. R. (2021). “Nopal cladode (*Opuntia ficus-indica*) flour: production, characterization, and evaluation for producing bioactive film”, *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 100703.
- FRISBY, M. A., Córdova Y. A., y Medina O. F. A. (2018). “Diversificación en el uso del agave del bacanora: oportunidad económica para Sonora”, en *Impacto socio-ambiental, territorios sostenibles y desarrollo regional desde el turismo*. México: Universidad Nacional Autónoma de México / Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional, 502-517.

- GAMIZ, C. M. (2021). “Las tortillas de nopal, solución alimentaria saludable”. https://www.redinnovagro.in/casosexito/2017/Nopal_Procesadora_Salud_y_Nutrici%C3%B3n.pdf.
- GARCÍA, P., Guzmán, V., y López, M. (2007). “Fructanos del agave. La tecnología, del campo de experimentación a la parcela del productor”, *Agroproduce*, 20-22.
- GAYTÁN, M. S. (2018). “The perils of protection and the promise of authenticity: tequila, mezcal, and the case of NOM 186”, *Journal of Rural Studies*, 58, 103-111.
- GAYTÁN, M. S. (2014). *¡Tequila! Distilling the spirit of Mexico*. Stanford University Press. <http://www.sup.org/books/title/?id=23483>.
- GENTRY, H. S. (1982). *Agaves of Continental North America*. Tucson: The University of Arizona Press.
- GSCHAEDLER, A., Gallardo, J., y Villanueva, S. (2008). “El proceso de elaboración del mezcal en el estado de Michoacán”, en J. G. Valdez (ed.), *La producción del mezcal en el estado de Michoacán*. Michoacán: Gobierno del Estado de Michoacán, 50-63.
- GUTIÉRREZ-CORONADO, M. L., Acedo-Félix, E., y Valenzuela-Quintanar, A. I. (2007). “Industria del bacanora y su proceso de elaboración / Bacanora industry and its process of production”, *CYTA-Journal of Food*, 5(5), 394-404.
- HERRERA-PÉREZ, L., Valtierra-Pacheco, E., Ocampo-Fletes, I., Tornero-Campante, M. A., Hernández-Plascencia, J. A., y Rodríguez-Macías, R. (2018). “Esquemas de contratos agrícolas para la producción de *Agave tequilana* Weber en la región de tequila, Jalisco”, *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 15(4), 619-637.
- KIRCHMAYR, M. R., Segura-García, L. E., Lappe-Oliveras, P., Moreno-Terrazas, R., de la Rosa, M., y Mathis, A. G. (2017). “Impact of environmental conditions and process modifications on microbial diversity, fermentation efficiency and chemical profile during the fermentation of mezcal in Oaxaca”, *LWT-Food Science and Technology*, 79, 160-169.
- LOAYZA, G. D., y J. Chávez (2007). “Estudio bromatológico del clado del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para el consumo humano”, *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 73(1), 41-45

- MOLINA-GUERRERO, J. A., Botello-Álvarez, J. E., Estrada-Baltazar, A., Navarrete-Bolaños, J. L., Jiménez-Islas, H., Cárdenas-Manríquez, M., y Rico-Martínez, R. (2007). “Compuestos volátiles en el mezcal”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6(1), 41-50.
- MONTOYA-BALLESTEROS, L. C., Gardea-Béjar, A., Ayala-Chávez, G. M., Martínez-Núñez, Y. Y., y Robles-Ozuna, L. E. (2010). “Capsaicinoides y color en chiltepín (*Capsicum annuum* var. *aviculare*): efecto del proceso sobre salsas y encurtidos”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(2), 197-207.
- PEÑA-VALDIVIA, C. B., Trejo, C., Arroyo-Peña, V. B., Sánchez-Urdaneta, A. B. y Balois-Morales R. (2012). “Diversity of unavailable polysaccharides and dietary fiber in domesticated Nopalito and Cactus Pear Fruit (*Opuntia* spp.)”. *Chemistry & Biodiversity*, 9, 1599–1610.
- PINAL, L., Ceden, M., Gutie, H., y Álvarez-Jacobs, J. (1997). “Fermentation parameters influencing higher alcohol production in the tequila process”, *Biotechnology Letters*, 19(1), 45-47.
- PRABHA, K., Ghosh, P., Abdullah, S., Joseph, R. M., Krishnan, R., Rana, S. S., y Pradhan, R. C. (2021). “Recent development, challenges, and prospects of extrusion technology”, *Future Foods*, 100019.
- PRADO-JARAMILLO, N., Estarrón-Espinosa, M., Escalona-Buendía, H., Cosío-Ramírez, R., y Martín-del-Campo, S. T. (2015). “Volatile compounds generation during different stages of the tequila production process. A preliminary study”, *LWT-Food Science and Technology*, 61(2), 471-483.
- PROFEPA (2019). “Acciones y resultados de protección a biznagas en 2019”. México: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. <https://www.gob.mx/profepa/es/articulos/acciones-y-resultados-de-proteccion-a-biznagas-en-2019?idiom=es>.
- RAMÍREZ, M. C. C. (2002). *Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México*. México: UNAM, Instituto de Geografía. <http://acervo.siap.gob.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=6067>.
- RAMÍREZ-GUZMÁN, K. N., Torres-León, C., Martínez-Medina, G. A., de la Rosa, O., Hernández-Almanza, A., Álvarez-Perez, O. B., Araujo, R., Rodríguez, G. L., Londoño, I., Ventura, J., Rodríguez,

- R., Martínez, J. L., y Aguilar, C. N. (2019). “Traditional fermented beverages in Mexico”, en A. M. Grumezescu y A. M. Holban (eds.), *Fermented beverages*. Woodhead Publishing, 605-635.
- REYES-AGÜERO, J. A. y Aguirre-Rivera, J. R. (2011). “Agrobiodiversity of cactus pear (*Opuntia*, *Cactaceae*) in the Meridional Highlands Plateau of Mexico”, *Journal of Natural Resources and Development*, 1:1–9.
- RIAZ, M. N. (2019). “Food extruders”, en M. Kutz (ed.), *Handbook of farm, dairy and food machinery engineering*. Academic Press, 485-497.
- ROMO, P. (2018). “Tequila sector estratégico del mercado interno”, *El Economista*, México D.F., 1 de noviembre. <https://www.economista.com.mx/estados/Tequila-sector-estrategico-del-mercado-interno-20181101-0138.html>.
- SADER (2020). “Crece en México el consumo y producción de nopal: agricultura”. México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crece-en-mexico-el-consumo-y-produccion-de-nopal-agricultura?idiom=es>.
- SADER (2019a). “La producción en zonas áridas de México”. México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-produccion-en-zonas-aridas-de-mexico?idiom=es>
- SADER (2019b). “Santo mezcal, bendito tequila, también bacanora, sotol y raicilla”. México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/santo-mezcal-bendito-tequila-tambien-bacanora-sotol-y-raicilla?idiom=es>.
- SAGARPA (2014). *Tecnología para la producción intensiva de nopal para verdura en Tamaulipas*. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SALAZAR, S. V. (2004). *La industria mezcalera de Sonora: factor de desarrollo local para el área de denominación de origen del bacanora*. Hermosillo: Fondo Estatal para Proyectos Productivos del Bacanora, Secretaría de Economía / CIAD.
- SALAZAR SOLANO, V. (2007). “La industria del bacanora: historia y tradición de resistencia en la sierra sonorensis”, *Región y Sociedad*, 19(39), 105-133.

- SOBARZO, H., (2006). “Vocabulario sonorense”. Hermosillo, Son.: Instituto Sonorense de Cultura, Programa Editorial de Sonora 2006. http://isc.sonora.gob.mx/bibliotecadigitalsonora/wp-content/uploads/2016/08/Sobarzo_-Horacio-Vocabulario-sonorense.pdf.
- SPIAZZI, E. A., y Mascheroni, R. (2001). “Modelo de deshidratación osmótica de alimentos vegetales”, *Mat-Serie A*, 4, 23-32.
- TÉLLEZ, M. P. (1998). “El cocimiento, una etapa importante en la producción del tequila”, *Bebidas Mexicanas*, 7(1) 19-20.
- TÉLLEZ-MORA, P., Peraza-Luna, F. A., Feria-Velasco, A., y Andrade-González, I. (2012). “Optimización del proceso de fermentación para la producción de tequila, utilizando la metodología de superficie de respuesta (MSR)”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 11(1), 163-176.
- TORRES-PONCE, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. D. L., y Nevárez-Moorillón, G. V. (2015). “El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1129-1142.
- UNAM (2018). “México cuenta con 159 especies de agave; investigadores de la UNAM encontraron 4 nuevas”. Boletín UNAM-DGCS-045. Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018_045.html.

CAPÍTULO 13
BEBIDAS ALCOHÓLICAS
TRADICIONALES DE ZONAS ÁRIDAS
BACANORA Y SOTOL

BELINDA VALLEJO-CÓRDOBA
LILIA MARÍA BELTRÁN-BARRIENTOS
RICARDO REYES-DÍAZ
MARÍA DEL CARMEN ESTRADA-MONTOYA
MARÍA DE JESÚS TORRES-LLANEZ
ADRIÁN HERNÁNDEZ-MENDOZA
AARÓN FERNANDO GONZÁLEZ-CÓRDOVA¹

RESUMEN

En las regiones áridas del norte de México se identifican dos bebidas destiladas tradicionales: el bacanora y el sotol. Ambas bebidas espirituosas son consideradas como variedades de mezcal; la primera se deriva del *Agave angustifolia* Haw, y la segunda, del género *Dasyliirion*. La tecnología desarrollada para la destilación de los agaves se ha mantenido sin cambios notables prácticamente desde su introducción por los colonizadores españoles. El proceso de producción de estas dos bebidas incluye varias etapas en común, siendo el tipo de planta uno de los factores que más influyen sobre las características típicas que las diferencian. En este capítulo se presenta información sobre la caracterización de estas bebidas en términos de normativa, denominación de origen, composición química y atributos sensoriales determinantes de la calidad final de los productos y de su aceptación por parte del consumidor.

PALABRAS CLAVE: aroma y sabor, bacanora, bebidas alcohólicas artesanales, destilados mexicanos, volátiles, sotol.

¹ Laboratorio de Calidad, Autenticidad y Trazabilidad de los Alimentos. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD, A.C.). Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46, Col. La Victoria, C.P. 83304, Hermosillo, Sonora. Autor de correspondencia: vallejo@ciad.mx.

INTRODUCCIÓN

La variedad de bebidas espirituosas provenientes del agave –cuyo origen data del periodo prehispánico– es reflejo de la diversidad biológica de estas plantas, las cuales constituyen un patrimonio tanto biológico como cultural de México. Hasta antes de la llegada de los españoles, el pulque (jugo de agave fermentado) había sido la única bebida alcohólica disponible, pero a partir de la Conquista los colonizadores trajeron su conocimiento sobre las técnicas de destilación para producir los llamados “vinos de agave” o “vinos de mezcal”, de los cuales surgió el tequila a fines del siglo XIX (Vallejo-Córdova y González-Córdova, 2007).

El agave es el género más representativo de la antigua familia *Agavaceae*, y a la cual pertenecían otros géneros de plantas, como *Beschorneria*, *Manfreda*, *Polianthes*, *Prochnyanthes*, *Furcraea*, *Hesperaloe*, *Hesperoyucca* y *Yucca*. Estos géneros actualmente se encuentran en la familia *Asparagaceae*, según el sistema de clasificación APG II (AGP II, 2003). De todo este grupo de plantas se obtienen beneficios, como fibras, alimento, material de construcción, sustitutos del jabón, etcétera. En particular, el género *Agave* incluye varias especies de plantas con una forma característica de roseta y poseen raíces muy ramificadas, cutícula gruesa y hojas suculentas (Domínguez *et al.*, 2008); es endémico de América, con distribución que va desde Estados Unidos hasta la zona tropical de Sudamérica, y consta de aproximadamente 200 especies. En México habitan 75% de estas especies, con mayor abundancia en los estados de Oaxaca, Puebla, Sonora, Querétaro, Durango y Sinaloa, con 37, 31, 30, 26, 25 y 21 especies, respectivamente (López-Romero *et al.*, 2018). Por muchos siglos, los agaves han sido muy importantes en la agricultura mexicana, ya que soportan condiciones ambientales extremas, como sequía, frío y tormentas, y pueden crecer en suelos nutricionalmente pobres (Parsons, 2012). Estas plantas se han utilizado desde la época prehispánica por su actividad biológica, especialmente como auxiliar medicinal y materia prima para la producción de jarabes y fibras naturales (López-Romero *et al.*, 2018). Además, los agaves son las principales plantas del grupo de las asparagáceas, de las cuales se obtienen bebidas fermentadas destiladas de gran importancia económica, como lo son el tequila y el mezcal (García-Mendoza, 2012).

En las regiones montañosas de los estados del norte de México, se producen el bacanora y el sotol. En el estado de Sonora se prepara el bacanora a partir de *A. angustifolia* Haw (López-Romero *et al.*, 2018). Por su parte, el sotol es una bebida destilada en los estados de Durango, Coahuila y Chihuahua, obtenida de plantas del género *Dasyliirion* (García-Mendoza, 2012), que, al igual que los agaves, pertenece a la familia *Asparagaceae*. La tecnología desarrollada para la elaboración de estas bebidas espirituosas se ha mantenido sin cambios notables prácticamente desde su introducción por parte de los colonizadores españoles. El proceso de producción incluye varias etapas, que van de la selección y recolección, jima de la planta realizadas en el campo y varias actividades que toman lugar en la vinata, tal como el cocimiento de la piña, la fermentación y la destilación, hasta la estandarización y el envasado. Si bien ambas bebidas gozan de una denominación de origen (DO) como protección comercial, poco se conoce de su composición o los factores que determinan su calidad. En este capítulo se presenta la información disponible que permite conocer el estado del arte en términos de caracterización química y sensorial del bacanora y del sotol, determinantes de la calidad final de los productos y de su aceptación por el consumidor.

NORMATIVA Y DENOMINACIÓN DE ORIGEN

La norma oficial mexicana NOM-199-SCFI-2017 (Bebidas alcohólicas-Denominación, especificaciones fisicoquímicas, *información comercial y métodos de prueba*) (CCONNSE, 2017) tiene por objeto establecer la denominación, las especificaciones fisicoquímicas y la información comercial que deben cumplir todas las bebidas alcohólicas producidas, envasadas o importadas que se vendan en territorio mexicano. En esta norma se mencionan las clasificaciones de las bebidas alcohólicas según su proceso de elaboración y sus respectivas especificaciones, dentro de las cuales se encuentran las bebidas alcohólicas destiladas, como el bacanora y el sotol. Estas bebidas, al igual que otras, deben cumplir con límites específicos de metales (≤ 0.5 mg de plomo y arsénico/l), metanol (≤ 300 mg/100 ml de alcohol anhidro), aldehídos (≤ 40 mg/100 ml de alcohol anhidro), furfural (≤ 5 mg/100 ml de alcohol anhidro) y alcoholes superiores (≤ 500 mg/100 ml de alcohol anhidro).

Además, por ser el bacanora y el sotol bebidas alcohólicas destiladas con DO, están reguladas por normas específicas: norma oficial mexicana NOM-168-SCFI-2005 (Bebidas alcohólicas. Bacanora. Especificaciones de elaboración, envasado y etiquetado) (SE, 2005) y norma oficial mexicana NOM-159-SCFI-2004 (Bebidas alcohólicas. Sotol. Especificaciones y métodos de prueba) (SE, 2004).

BACANORA

El bacanora, por definición normativa, es la bebida alcohólica regional del estado de Sonora, México, obtenida por destilación y rectificación de mostos, preparados directa y originalmente con los azúcares extraídos de la molienda de las cabezas maduras de *Agave angustifolia* Haw (figura 1), hidrolizadas por cocimiento y sometidas a fermentación alcohólica con levaduras (SE, 2005). El *Agave angustifolia* Haw es una planta perenne con hojas alargadas (60-120 por 3.5-10 cm cuando están maduras) y suculentas dispuestas en espiral sobre un tallo corto (20-60 cm de largo), que forman una roseta cespitosa abierta de 1.0-1.5 m de alto por 1.5-2.0 m de diámetro. Sus hojas tienen formas que varían de lineales a lanceoladas; son ascendentes a horizontales, de color verde claro a verde grisáceo, planas o cóncavas hacia el ápice, convexas hacia la base, angostándose hacia la base y terminando en una espina apical de 1.5-3.5 cm de longitud, y con dientes de 2 a 5 mm de longitud; crece de manera silvestre en gran parte del noroeste de México, distribuida al azar o de manera aislada (Esqueda *et al.*, 2013).

El bacanora es un líquido que, según su tipo, es incoloro o amarillento cuando es madurado en recipientes de madera de roble o encino, o cuando se aboque sin madurarlo. La NOM-168-SCFI-2005 se refiere a la DO “bacanora”, cuya titularidad corresponde al Estado mexicano. La norma es aplicable a la elaboración, envasado y comercio de la bebida alcohólica que se elabora exclusivamente a partir del *Agave angustifolia* Haw que haya sido cultivado o recolectado dentro del área de DO, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 6 de noviembre de 2000.

FIGURA 1



Planta de Agave (*Agave angustifolia* Haw).
Fuente: Belinda Vallejo-Córdoba.

De acuerdo con el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), la zona geográfica para proteger la DO incluye municipios de las regiones Sierra Centro, Río Sonora y San Miguel; Centro; Sierra Alta, y Sierra Sur del estado de Sonora. Estos municipios son los siguientes: Bacanora, Sahuaripa, Arivechi, Soyopa, San Javier, Cumpas, Moctezuma, San Pedro de la Cueva, Tepache, Divisaderos, Granados y Huásabas, Villa Hidalgo, Bacadehuachi, Nácori Chico, Huachinera, Villa Pesqueira, Aconchi, San Felipe de Jesús, Huépac y Banámichi, Rayón, Baviácora, Opodepe, Arizpe, Rosario, Quiriego, Suaqui Grande, Onavas, Yécora, Alamos, San Miguel de Horcasitas, Ures, Mazatán y La Colorada (*Diario Oficial de la Federación*, 2000).

El bacanora se clasifica, de acuerdo con su proceso posterior a la destilación y rectificación, en cuatro tipos: blanco, joven u oro, reposado y añejo. Según la NOM-168-SCFI-2005, se denomina “bacanora blanco” al producto cuya graduación alcohólica comercial debe, en su caso, ajustarse con agua de dilución; “bacanora joven u oro” al producto susceptible a ser abocado, cuya graduación alcohólica comercial debe, en su caso ajustarse con agua de dilución (el resultado de las mezclas de bacanora blanco con bacanora reposado o añejo se considera bacanora joven u oro). Por otro lado, el “bacanora reposado” es el producto susceptible de ser abocado, que se deja por lo menos dos meses en recipientes de

madera de roble o encino, cuya graduación alcohólica comercial debe, en su caso, ajustarse con agua desmineralizada, potable o destilada (mezclas de diferentes bacanoras reposados, la edad del cual es el promedio ponderado de las edades y volúmenes de sus componentes). Además, el “bacanora añejo” es el producto susceptible de ser abocado, sujeto a un proceso de maduración de por lo menos un año en recipientes de madera de roble o encino, cuya capacidad máxima es de 200 litros, y con una graduación alcohólica comercial que debe, en su caso, ajustarse con agua potable o destilada (mezclas de diferentes bacanoras añejos, la edad del cual es el promedio ponderado de las edades y volúmenes de sus componentes) (SE, 2005).

Se puede denominar como “bacanora 100% de agave” al producto que se obtiene de la destilación y rectificación de mostos, preparados directa y originalmente con los azúcares extraídos de la molienda de las cabezas maduras del agave, hidrolizadas por cocimiento y sometidas a fermentación alcohólica con levaduras. En relación con el sabor, olor o color, la normativa se limita a especificar que deben ser características del producto. Por otro lado, sí se especifican rangos o límites de valores para diferentes parámetros fisicoquímicos, como lo son contenido alcohólico (38-55% Alc. Vol. a 20°C), extracto seco (0.2-11 g/l), acidez total (0-170 mg de ácido acético/100 ml de alcohol anhidro), metanol (30-300 mg/100 ml de alcohol anhidro), alcoholes superiores (100-400 mg/100 ml de alcohol anhidro), aldehídos (≤ 40 mg/100 ml de alcohol anhidro), furfural (4 mg/100 ml de alcohol anhidro), ésteres (2-200 mg de acetato de etilo/100 ml de alcohol anhidro; pudiendo contener hasta 250 mg si es reposado o añejo), cobre (Cu) (≤ 2 mg/l), plomo (Pb) (≤ 0.5 mg/l), arsénico (As) (≤ 0.5 mg/l) y zinc (Zn) (≤ 1.5 mg/l). Además de cumplir con estas especificaciones, los productores de bacanora deben estar inscritos en el Registro de Plantación de Predios, instalado para tales efectos por el organismo de certificación de producto acreditado, y dentro de otras consideraciones normativas, el productor debe demostrar en todo momento, a la persona acreditada y aprobada, que el producto no ha sido adulterado en las operaciones unitarias durante su elaboración, en particular a partir de la formulación de los mostos (SE, 2005).

SOTOL

El sotol es la bebida alcohólica que se obtiene de las plantas conocidas comúnmente como sotol o sereque (pertenecientes al género *Dasyliirion* de la familia *Asparagaceae*, anteriormente incluida dentro de la familia *Ruscaceae*) (figura 2), obtenidas de poblaciones naturales y cultivadas en los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango; que comparten la DO del producto. Estas regiones presentan características comunes fitogeográficas con ambientes extremos (de los tipos desértico y estepario, con prolongadas sequías, calor intenso en verano y heladas severas en invierno, y cuentan con grandes periodos de luz solar que demandan las especies xerófilas) (*Diario Oficial de la Federación*, 2002).

FIGURA 2



Planta del Sotol (*Dasyliirion*).
Fuente: Belinda Vallejo-Córdoba.

La planta sotol o sereque es de hojas largas y fibrosas de forma lanceolada, de color verde, cuya parte aprovechable para la elaboración del sotol es la piña o cabeza. Su tallo es un cáudice, una estructura de almacenamiento con gran volumen y poca superficie de exposición, la cual se cubre con los restos de las hojas desarrolladas. Dichas hojas, además de proporcionar soporte mecánico, pudieran funcionar como aislantes

térmicos para el tallo, disminuyendo así la transpiración; son perennes y alargadas, de color verde claro a verde grisáceo o glauco, con espinas en los márgenes y recubiertas de una capa de hidrocarburos que forman una cutícula gruesa (Reyes-Valdés *et al.*, 2013).

Existen vestigios de que la planta del sotol ha sido usada desde hace más de 800 años por los pobladores del Paquimé, en el estado de Chihuahua, por las diferentes tribus de indígenas y apaches con fines alimenticios, religiosos, medicinales o para elaborar cestería. A partir de la Conquista, los españoles implantaron métodos de destilación más eficaces y fue entonces que comenzaron a fabricarse y beberse alcoholes destilados. La producción del sotol en el estado de Coahuila data de principios del siglo XX, cuando en 1908 se construyó una vinata en Parras de la Fuente (*Diario Oficial de la Federación*, 2002). Por otro lado, en el estado de Durango la producción del sotol data de la última década del siglo XIX y primera del XX, y es una bebida típica de los municipios de Cuencamé y Mapimí. El Estado mexicano es el titular de la DO del sotol otorgada a todos y cada uno de los municipios que conforman los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango, y sólo puede usarse mediante autorización por parte del IMPI.

La NOM-159-SCFI-2004 considera al sotol como una bebida alcohólica obtenida por destilación y rectificación de mostos, preparados directa y originalmente del material derivado de la molienda de las cabezas maduras de *Dasyliirion* spp., previa o posteriormente hidrolizadas o cocidas, y sometidos a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no, siendo susceptible de ser enriquecido por otros azúcares hasta en una proporción no mayor de 49% (en esta acción o mezcla no están permitidas las mezclas en frío). El sotol es un líquido que, de acuerdo con su tipo, es incoloro o amarillento cuando es madurado en recipientes de madera de roble, encino, acacia, castaño, haya, fresno, u otras alternativas tecnológicas, o cuando se aboque sin madurarlo (SE, 2004).

De acuerdo con las características adquiridas en procesos posteriores a la destilación y rectificación, el sotol se puede clasificar en cuatro tipos: blanco, joven, reposado y añejo. Según la NOM-159-SCFI-2004, se denomina “sotol blanco” al producto cuya graduación alcohólica comercial debe, en su caso, ajustarse con agua de dilución; “sotol joven”, al producto susceptible de ser abocado, cuya graduación alcohólica comercial

debe, en su caso, ajustarse con agua de dilución (el resultado de las mezclas de sotol blanco con sotol reposado o añejo de 1 a 2 meses se considera sotol joven u oro); “sotol reposado” es el producto susceptible de ser abocado, que se deja por lo menos dos meses en recipientes de madera de roble, encino, acacia, castaño, haya, fresno, u otras alternativas tecnológicas, cuya graduación alcohólica comercial debe, en su caso, ajustarse con agua de dilución (en mezclas de diferentes sotoles reposados, la edad para el sotol resultante es el promedio ponderado de las edades y volúmenes de sus componentes); y “sotol añejo” es el producto susceptible de ser abocado, sujeto a un proceso de maduración de por lo menos un año en recipientes de madera de roble, encino, acacia, castaño, haya, fresno, cuya capacidad máxima es de 210 litros y con una graduación alcohólica comercial que debe, en su caso, ajustarse con agua de dilución (en mezclas de diferentes sotoles añejos, la edad para el sotol resultante es el promedio ponderado de las edades y volúmenes de sus componentes) (SE, 2004).

Por otro lado, para que el sotol sea considerado como 100% puro, el producto debe ser obtenido de la destilación y rectificación de mostos, preparados directa y originalmente del material extraído, dentro de las instalaciones de la fábrica, derivado de la molienda de las cabezas maduras de *Dasyliirion* spp., previa o posteriormente hidrolizadas o cocidas, y sometidos a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no, y embotellado en la planta de envasado, la cual debe estar ubicada dentro de la zona de DO (SE, 2004).

En relación con las características de sabor, aroma o color del sotol, éstas no se encuentran descritas en la NOM-159-SCFI-2004. Por otro lado, se especifican rangos o límites de valores para diferentes parámetros fisicoquímicos, como lo son contenido alcohólico a 20 °C (35-55% Alc. Vol.), extracto seco (0-0.20 g/L para el sotol blanco; 0-15 g/l para el sotol joven y añejo, alcoholes superiores (20-400 mg/100 ml de alcohol anhidro), metanol (≤ 300 mg/100 ml de alcohol anhidro), aldehídos (≤ 40 mg de acetaldehído/100 ml de alcohol anhidro), ésteres (2-270 mg de acetato de etilo/100 ml de alcohol anhidro, pudiendo alcanzar 350 mg para el sotol joven y hasta 360 mg para el reposado y añejo), y furfural (≤ 4 mg/100 ml de alcohol anhidro) (SE, 2004). Los límites para metales no se encuentran especificados en la NOM-159-SCFI-2004; sin embargo,

como el sotol se encuentra clasificado como una bebida alcohólica destilada, debe cumplir con los límites establecidos en la NOM-199-SCFI-2017, que es de ≤ 0.5 mg de plomo y arsénico/l (CCONNSE, 2017).

PROCESO DE PRODUCCIÓN ARTESANAL

Mezcal es el nombre genérico asignado a todas las bebidas espirituosas mexicanas, producto del cocimiento de las diferentes partes de los agaves. Estas bebidas alcohólicas destiladas se diferencian según la región de procedencia, especie o variedad de agave utilizado, procesamiento, etcétera. Sin embargo, los diferentes procesos de elaboración de estas bebidas espirituosas tienen pasos comunes que los caracteriza, los cuales se muestran en la figura 3. En este sentido, Salazar y Mungaray (2009) reportan que, así como al bacanora en Sonora, al mezcal se le conoce como comiteco en Chiapas; tequila en Jalisco; raicilla en la región costera de Jalisco y el oeste de Michoacán y Nayarit; tuxca y quitupan en Colima; sihuaquio en Guerrero; turicato en Michoacán; y sisal en Yucatán, entre otros. Sin embargo, la DO para el mezcal fue apropiada para designar al destilado de agave producido en la región comprendida en los estados de Oaxaca, Guerrero, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas (Salazar y Mungaray, 2009).

La industria del bacanora representa una fuente importante de ingresos para miles de familias. Algunos reportes estiman que más de 3 000 productores se dedican a su elaboración y generan una producción anual de 240 000 litros (Salazar y Mungaray, 2009). Los productores regionales, en su mayoría, aplican procesos de producción artesanales no estandarizados, carentes de una organización social del trabajo, especialización productiva, abasto de materia prima e insumos, maquinaria y equipo especializado, y servicios logísticos, entre otros. Sin embargo, el contar con una DO les permite una protección general de sus procesos y comercio. Al respecto, la NOM-168-SCFI-2005 no especifica un proceso general de elaboración del bacanora; sin embargo, entre algunas otras determinaciones, establece que para el proceso de elaboración del bacanora se permite la mezcla de piñas de *Agave angustifolia* Haw de diferente procedencia de la zona de la DO; la maduración debe llevarse

FIGURA 3

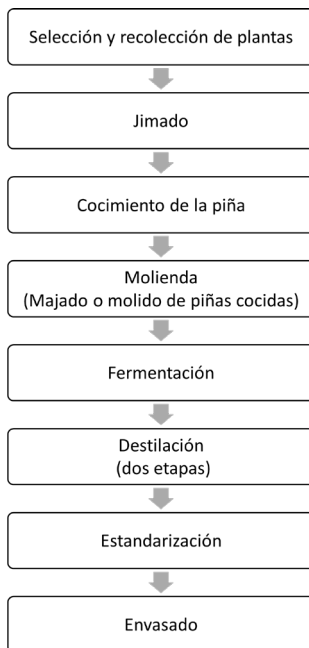


Diagrama general del proceso de producción del bacanora y sotol.

Fuente: Belinda Vallejo-Córdoba.

a cabo en recipientes de roble o encino; se debe constatar la existencia de recipientes y documentos de ingresos y extracciones de producto de esos recipientes a través de una bitácora foliada, y los recipientes en que se realiza deben estar sellados (impuestos y levantados por el organismo de certificación de producto acreditado y aprobado) durante todo el proceso (SE, 2005).

Dentro de las etapas de elaboración artesanal del bacanora, la selección, recolección y jima del agave se realizan en campo; el resto del proceso se lleva a cabo en la vinata, que es un establecimiento rudimentario equipado con un horno o malla de cocimiento, fosa o barranco para fermentar y un tren de destilación. En la recolección, se seleccionan agaves de por lo menos ocho años de edad; se procede a hacer el jimado eliminando la corteza de las piñas, las cuales son cocidas durante 2-4 días sobre rocas calientes depositadas en un horno natural de piedra volcánica y lodo, que

son cubiertas con lámina de metal y tierra para evitar la salida de calor. En este cocimiento, los carbohidratos de la piña son hidrolizados. Las piñas cocidas son molidas, generalmente golpeándolas con un mazo de madera, y el producto es vaciado en recipientes con agua para iniciar su fermentación para producir etanol; además, en este proceso se forman diversos metabolitos secundarios responsables del sabor y aroma. La fermentación es llevada a cabo por levaduras presentes de forma natural en las piñas cocidas, y se lleva a cabo en barriles rudimentarios con capacidad de 200 litros, o bien en barrancas: hoyos subterráneos, recubiertos de cemento rústico, donde se deja reposar por siete o más días a temperatura ambiente. A continuación, se procede a una primera destilación (desflemado) en barriles metálicos, calentados con leña de mezquite (árbol del género *Prosopis*); durante este proceso, los componentes volátiles se evaporan y posteriormente son devueltos a un estado líquido mediante condensación por enfriamiento en una serpentina de cobre. Una vez que se hierve el barril, se cubre y se sella con lodo para evitar fuga de vapores. Al terminar, se desecha el bagazo y el producto se somete a una segunda destilación, de la que se obtienen tres porciones: cabezas, medios y colas. Después de este proceso, el vinatero, basado en su conocimiento y experiencia, lleva a cabo un proceso de mezclado que consiste en combinar el producto obtenido en las diferentes etapas del destilado, para generar un producto final con un contenido de alcohol de 35-55 grados Gay Lussac (° GL) (Álvarez-Ainza *et al.*, 2009; Salazar y Mungaray, 2009).

En relación con el proceso de elaboración del sotol, existe escasa información; sin embargo, se sabe que su proceso es similar a los empleados para los mezcales, pero con ciertas particularidades diferentes por ser un destilado de una planta distinta a los agaves. El sotol es un producto también elaborado de forma artesanal en una vinata conformada por el alambique, el horno y el molino. El proceso es similar al del bacanora, donde la planta es colectada (se eligen las que presentan un tallo mayor a 30 cm) y se le cortan las hojas, proceso conocido como jimado, quedando una bola conformada por sus bases, que se empalman como las capas de la cebolla. Las cabezas se cuecen para ablandarlas metiéndolas al horno, donde en el piso se acomoda una capa de piedras de río, que se calientan con leña de encino (árbol del género *Quercus*) o de mezquite (árbol del género *Prosopis*), y cuando ya están bien calientes se

ponen encima las cabezas cosechadas dejándolas durante aproximadamente 36 a 72 horas, o hasta que se desprenda un olor distintivo a piñas cocidas. La parte de arriba de las cabezas se tapa con costales de raspa, palmas u hojas de sotol, y luego se les agrega una capa de tierra para que no se escape el vapor, y se quedan así por dos días completos. Ya cuando las cabezas están cocidas, se cortan en piezas pequeñas y se pasan al molino, donde reciben un proceso de molienda ligera. El producto molido se pasa a tanques de concreto, donde se lleva a cabo el proceso de fermentación durante varios días según el clima (dos o tres días en tiempo de calor y una semana en tiempo de frío), y cuando se desprende calor por el proceso de fermentación, se le empieza a agregar agua hasta que se complete la fermentación, que ocurre cuando el producto presenta sabor agrio sin dulzor. De los tanques, el producto se lleva a los peroles o cazos de cobre, que tienen forma de jarro, con capacidad de 300 litros y que están conectados a un alambique. Los peroles se calientan con leña o quemador de gas, y la primera destilación se inicia cuando los vapores pasan a los alambiques de cobre, que se encuentran inmersos en un tanque con agua fría, que promueve la condensación de los vapores. A este líquido se le conoce como “vino”. Este vino se vuelve a vaciar en un perol limpio, y se repite el proceso, y el resultado de esta nueva destilación es el sotol (Casas-Acevedo *et al.*, 2021; Vargas, 2009).

Como puede observarse, ambos procesos de producción, el del bacanora y el del sotol, son muy similares por compartir pasos clave. En consecuencia, es de esperarse que las diferencias en sabor y aroma en estas bebidas espirituosas sean determinadas por la materia prima empleada, ya que son especies de plantas que, si bien pertenecen a la misma familia *Asparagaceae*, corresponden a diferentes géneros taxonómicos. Asimismo, las diferencias entre bebidas del mismo tipo podrían deberse a las particularidades que cada productor lleva a cabo en sus procesos, que —es bien sabido— son procedimientos artesanales escasamente estandarizados.

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y SENSORIAL

Se ha reportado el perfil de compuestos volátiles y su relación con los atributos sensoriales de olor, aroma, gusto y sensaciones trigeminales del

bacanora. En este estudio, un panel entrenado pudo describir al bacanora como una bebida con notas de aroma a *agave cocido*, *agave verde*, *ahumado*, *cítrico*, *mentol*, *paja*, *alcohólico*, *floral*, *hierbas*, *humedad*, *moho*, *solvente* y *tierra húmeda*, entre otros. En relación con las notas del sabor, se describió como *dulce*, ácido y *amargo*; y las sensaciones del trigémino fueron *astrogente*, *picante* y *ardiente* (Álvarez-Ainza *et al.*, 2015). Se atribuye que dichas notas en la bebida se deben a la materia prima (*agave verde*, *agave cocido*, *ahumado*, etc.) y al proceso de fermentación (*afrutado*, *alcohol*, etc.), especialmente las notas alcohólicas debido a compuestos producidos por las levaduras presentes. Además, una nariz electrónica, que es un arreglo de sensores que emula a la nariz de los humanos, diferenció con claridad al bacanora de bebidas industrializadas tales como el tequila y el mezcal (Vallejo-Córdova y González-Córdova, 2007).

Por otro lado, hasta donde es de nuestro conocimiento, no se han reportado las características sensoriales del sotol en publicaciones científicas, pero se sabe que esta bebida en su forma más pura es de apariencia cristalina y brillante, con aroma floral y cítrico, y un sabor menos dulce y más seco que el tequila (Borboa, 2017). Además, en diferentes documentos disponibles en línea se pueden encontrar descriptores del sabor y aroma del sotol como a *hierbabuena*, *almendras*, *herbal*, *maderoso*, *resinoso*, ligeramente *ahumado*, con un *toque de tierra*, entre otros.

En diferentes estudios realizados con bebidas espirituosas mexicanas, se ha observado que los compuestos involucrados en el aroma y sabor del bacanora y del sotol fueron diferentes, principalmente en relación con el contenido de alcoholes, ácidos orgánicos, ésteres, aldehídos, terpenos, fenoles, furanos, cetonas, compuestos azufrados y bencenos, entre otros (Álvarez-Ainza *et al.*, 2015; Casas-Acevedo *et al.*, 2021; De la Garza *et al.*, 2010; De León-Rodríguez *et al.*, 2008; Lachenmeier *et al.*, 2006; Vallejo-Córdova y González-Córdova, 2007; Zavala-Díaz de la Serna *et al.*, 2020). Sin embargo, la presencia de todos los compuestos volátiles (mayores y menores) son importantes para cada tipo de bebida, ya que cuando están en armonía y equilibrio proporcionan las características típicas que caracterizan a cada producto.

En un estudio del perfil de volátiles de estas bebidas determinado por MEFS-CG (microextracción en fase sólida y cromatografía de gases), Vallejo-Córdova y González-Córdova (2007) reportaron que los

alcoholes fueron el grupo más abundante, seguido de los ésteres etílicos. Dentro del grupo de los alcoholes detectados en bacanora y sotol, se reportaron principalmente los siguientes: etanol, metanol, 1-propanol, 2-(3-)-metil-1-butanol, 2-metil-1-propanol, 3-methyl-1-butanol, y 2-feniletanol, entre otros. La mayoría de los alcoholes son compuestos deseables por ser una bebida alcohólica donde el compuesto mayoritario es el etanol; si bien por sí solos y en altas concentraciones los alcoholes no son compuestos de aroma agradable, lo son en bajas concentraciones, ya que dan notas de aroma deseables en bebidas alcohólicas. Por ejemplo, se ha reportado que el 2-metil-1-butanol y el 3-metil-1-butanol y el 2-feniletanol confieren aromas frutales y florales, respectivamente. Por el contrario, algunos alcoholes no son deseables, por ejemplo, el metanol, que es considerado tóxico para su consumo (Álvarez-Ainza *et al.*, 2015; Casas-Acevedo *et al.*, 2021; De León-Rodríguez *et al.*, 2008).

Por otro lado, dentro de los ésteres detectados, se encuentran el etanoato de etilo, etil éster de ácido 2-hidroxipropanoico y etil ésteres (C5-C18) (Álvarez-Ainza *et al.*, 2015; De León-Rodríguez *et al.*, 2008; Vallejo-Córdoba y González-Córdoba, 2007). Estos compuestos se han asociado a aromas y sabores afrutados agradables en bebidas alcohólicas (Álvarez-Ainza *et al.*, 2015). La gran abundancia de estos ésteres era de esperarse, ya que los ésteres etílicos se forman no sólo durante la fermentación, sino durante el añejamiento (Vallejo-Córdoba y González-Córdoba, 2007). También, en estas bebidas se encontraron aldehídos como el furfural (furan-2-metanal) o furan-2-carbaldehído (De León-Rodríguez *et al.*, 2008; Vallejo-Córdoba y González-Córdoba, 2007), que son un producto de la degradación de la hidrólisis de las pentosas durante la cocción de las piñas del bacanora y el sotol; estos aldehídos también pueden liberarse de las barricas de madera durante el almacenamiento y añejamiento. Si bien el furfural puede impartir un aroma agradable a almendras, las normas oficiales mexicanas establecen límites para su concentración, por su toxicidad; por ello, es deseable que se encuentre por debajo de los 4 mg/100 ml de alcohol anhidro en este tipo de bebidas.

En otro estudio, se aplicó análisis sensorial descriptivo al bacanora, y se encontraron valores significativos de correlación entre notas de sabor y aroma con abundancias de volátiles minoritarios. Por ejemplo, el terpineol (2-(4-metil-1-ciclohex-3-enil) propan-2-ol) fue altamente asociado

con la nota *agave verde*; el 2-isopropil-2-metilfenol (carvacrol) con *herbáceo* y ácido; ácidos decanoico y octanoico con ácido y *dulce*; ácido acético (ácido etanoico) con ácido; etil ester de ácido octanoico con *quemado*; 5-metoxi fenol (guaiacol) con *herbáceo*, *quemado* y *amargo*; ácido 3-metilbutanoico con ácido; y el ácido hexanoico con *quemado* (Álvarez-Ainza *et al.*, 2015). En relación con el sotol, no se cuenta con un estudio que relacione la abundancia de volátiles y notas de sabor o aroma; sin embargo, se han reportado compuestos importantes como el 3-metil-1-butil acetato y limoneno (1-metil-4-(1-metiletenil)-ciclohexeno) que han sido asociados a notas deseables a frutal y cítrico, respectivamente (Casas-Acevedo *et al.*, 2021). Estos volátiles minoritarios en bacanora y sotol pueden ser considerados compuestos clave por asociarse a notas particulares que tipifican a estas bebidas espirituosas, ya que están asociados a la materia prima y al proceso de fermentación.

CONCLUSIONES

Si bien la producción artesanal de bacanora y sotol en las regiones áridas del norte de México data de la época prehispánica y ambas bebidas gozan de DO para su protección durante su comercio, aún existe muy escasa información en términos de caracterización química y su relación con atributos sensoriales de sabor y aroma. Por lo anterior, es necesario que se realice más investigación a fin de establecer parámetros de calidad basados no sólo en la composición química, sino también en la calidad sensorial. La estandarización de los procesos artesanales para la producción de estas bebidas podría facilitar estudios conducentes al establecimiento de parámetros de calidad basados en atributos sensoriales, que al final son los que determinan la aceptación por parte del consumidor.

REFERENCIAS

- ÁLVAREZ-AINZA, M. L., A. García-Galaz, H. González-Ríos, N. Prado-Jaramillo, y E. Acedo-Félix (2015). "Sensory analysis and minor volatile compounds of distilled from agave angustifolia haw

- (Bacanora)”, *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud. Biotecnia*, 17(3), 22-29.
- ÁLVAREZ-AINZA, M. L., K. A. Zamora-Quíñonez, y E. Acedo-Félix (2009). “Perspectivas para el uso de levaduras nativas durante la elaboración de bacanora”, *Rev Latinoam Microbiol*, 51(1-2), 58-63.
- APG II (2003). “An update of the Angiosperm Phylogeny Group Classification for the orders and families of flowering plants: APG II”, *Botanical Journal of the Linnean Society*, 141, 399-436.
- BORBOA, C. (2017). “La raicilla y el sotol son destilados que comienzan a despuntar en México”, *El Universal* [en línea]. <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/menu/2017/06/26/la-raicilla-y-el-sotol-son-destilados-que-comienzan-despuntar-en-mexico>.
- CASAS-ACEVEDO, A., F. Veana, D. Montet, C. N. Aguilar, O. M. Rutiaga-Quíñones, y R. Rodríguez-Herrera (2021). “Microbial and chemical changes during the production of sotol: a Mexican alcoholic beverage”, *Food Biotechnology*, 35(1), 67-90.
- CCONNSE (Comité Consultivo Nacional de Normalización de la Secretaría de Economía) (2017). “Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017. Bebidas alcohólicas. Denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba”, *Diario Oficial de la Federación*. DOF: 30/10/2017, http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5502882&fecha=30/10/2017.
- DE LA GARZA, H., J. Buenrostro, M. Reyes-Vega, R. Rodríguez, D. G. Martínez, y C. N. Aguilar (2010). “Chemical profile of Sotol analyzed by solid phase microextraction-gas chromatography”, *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 5(3), 261-268.
- Diario Oficial de la Federación (2002). “Declaratoria general de protección de la denominación de origen Sotol”, 8 de agosto. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/494502/DO.Sotol.08.08.2002.pdf>.
- Diario Oficial de la Federación IMPI (2000). “Declaratoria general de protección a la denominación de origen Bacanora”, 6 de noviembre. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063368&fecha=31/12/1969&print=true.

- DOMÍNGUEZ, M. S., M. L. González, C. Rosales, C. Quiñones, S. Delgadillo, S. J. Mireles y M. B. Pérez (2008). "El cultivo in vitro como herramienta para el aprovechamiento, mejoramiento y conservación de especies del género agave", *Investigación y Ciencia*, 16(41), 53-62.
- ESQUEDA, M., M. L. Coronado, A. H. Gutiérrez y T. Fragoso Gadea (2013). "*Agave angustifolia* Haw. Técnicas para el trasplante de vitroplantas a condiciones de agostadero", México: Sagarpa / CIAD / UES / Sinarefi. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/168835/Agave_angustifolia_Haw_T_cnicas_para_el_Transplante_de_Vitroplantas_a_Condiciones_de_Agostadero.pdf.
- GARCÍA-MENDOZA, A. J. (2012). "México, país de magueyes", *La Jornada del Campo*, suplemento de *La Jornada* (México), 18 de febrero, p. 4. <https://www.jornada.com.mx/2012/02/18/cam-pais.html>.
- LACHENMEIER, D. W., E. M. Sohnius, R. Attig, y M. G. López (2006). "Quantification of selected volatile constituents and anions in Mexican agave spirits (tequila, mezcal, sotol, bacanora)", *J. Agric. Food Chem*, 54, 3911-3915.
- LEÓN-RODRÍGUEZ, A. de, P. Escalante-Minakata, M. I. Jiménez-García, L. G. Ordóñez-Acevedo, J. L. Flores-Flores, y A. P. Barba de La Rosa (2008). "Characterization of volatile compounds from ethnic agave alcoholic beverages by gas chromatography mass spectrometry", *Journal Food Technology and Biotechnology*, 46, 448-455.
- LÓPEZ-ROMERO, J. C., J. F. Ayala-Zavala, G. A. González-Aguilar, E. A. Peña-Ramos y H. González-Ríos (2018). "Biological activities of agave by-products and their possible applications in food and pharmaceuticals", *J Sci Food Agric*, 98, 2461-2474.
- PARSONS, J. R. (2012). "Altiplano de México: los agaves en la economía tradicional", *La Jornada del Campo*, suplemento de *La Jornada* (México), 18 de febrero, p. 6. <https://www.jornada.com.mx/2012/02/18/cam-economia.html#:~:text=Por%20muchos%20siglos%2C%20los%20agaves,importantes%20en%20la%20agricultura%20mexicana.&text=En%20casi%20todas%20las%20condiciones,ma%C3%ADz%20y%20otros%20granos%20b%C3%A1sicos>.

- REYES-VALDÉS M. H., A. Benavides-Mendoza, H. Ramírez-Rodríguez y J. A. Villarreal-Quintanilla (2013). “Biología e importancia del sotol (*Dasyilirion* spp.). Prte II: Ecofisiología, usos e interrogantes”, *Planta*, 8(17). ISSN: 2007-1167.
- SALAZAR S., V., y A. Mungaray (2009). “La industria informal del mezcal bacanora”, *Estudios Sociales*, 17(33), 163-198.
- SE (Secretaría de Economía) (2005). “Norma Oficial Mexicana NOM-168-SCFI-2005. Bebidas alcohólicas. Bacanora. Especificaciones de elaboración, envasado y etiquetado”, *Diario Oficial de la Federación*, 14. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4917328&fecha=14/12/2005.
- SE (Secretaría de Economía) (2004). “Norma Oficial Mexicana NOM-159-SCFI-2004. Bebidas alcohólicas. Sotol. Especificaciones y métodos de prueba”, *Diario Oficial de la Federación*. 16 de junio. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo45110.pdf>.
- VALLEJO-CÓRDOBA, B., y González-Córdova, A. F. (2007). “Latest advances in the chemical and flavor characterization of Mexican distilled beverages: tequila, mezcal, bacanora, and sotol”, en M. Tunick y M. González de Mejía, *Hispanic foods. Chemistry and flavor*. Washington, D. C.: American Chemical Society, ACS Symposium Series 946, 153-166.
- VARGAS, J. (2009). “Entrevista. El proceso del sotol en una vinata”, *Cuadernos Fronterizos. Revista de las Fronteras*, 8(2), 32-36.
- ZAVALA-DÍAZ DE LA SERNA, F. J., R. Contreras-López. L. P. Lerma-Torres, F. Ruiz-Terán, B. A. Rocha-Gutiérrez, S. B. Pérez-Vega, L. R. Elías-Ogaz, e I. Salmerón (2020). “Understanding the biosynthetic changes that give origin to the distinctive flavor of sotol: microbial identification and analysis of the volatile metabolites profiles during sotol (*Dasyilirion* sp.) must fermentation”, *Biomolecules*, 10, 1063.

CAPÍTULO 15
EXUDADOS DE PLANTAS DE
LAS ZONAS ÁRIDAS EN LA TECNOLOGÍA
DE MASAS CONGELADAS

PERLA G. ARMENTA-AISPURO¹

YOLANDA L. LÓPEZ-FRANCO²

OFELIA ROUZAUD-SÁNDEZ³

JAIME LIZARDI-MENDOZA⁴

JOSÉ LUIS CÁRDENAS-LÓPEZ⁵

CRISTINA M. ROSELL^{6, 7}

RESUMEN

En las últimas dos décadas, la ciencia y la tecnología de las masas congeladas ha experimentado un progreso notable en la exploración y comprensión de las interacciones entre la estructura, la textura y la estabilidad de la masa durante el almacenamiento en congelación, que favorecen la obtención de un producto semejante a los panes de masa fresca. Esto ha permitido a los tecnólogos alimentarios darse cuenta de que la

¹ Grupo de Investigación en Biopolímeros. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas, No. 46, C.P. 83304, Hermosillo, Sonora, México. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora. Blvd. Luis Encinas y Rosales, Col. Centro, C.P. 83000, Hermosillo, Son., México.

² Grupo de Investigación en Biopolímeros. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Autor de correspondencia: lopezfm@ciad.mx.

³ Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora.

⁴ Grupo de Investigación en Biopolímeros. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C

⁵ Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora.

⁶ Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos. Calle Catedrático Agustín Escardino 7 C.P 46980, Paterna, Valencia, España.

⁷ Department of Food and Human Nutritional Sciences. Faculty of Agriculture and Food Sciences University of Manitoba, Canada.

incorporación de ingredientes funcionales en sistemas de masas modelo o reales puede proporcionar una tecnofuncionalidad dirigida a estabilizar la viscoelasticidad, debido a su capacidad de interactuar con el agua.

Los exudados de plantas de las zonas áridas presentan propiedades tecnofuncionales como: espumante, emulsionante, encapsulante, estabilizante, gelificante, agentes de absorción de agua y aceite; además, son formadores de películas e inhibidores de sinéresis. Estas propiedades constituyen la base funcional de estos polisacáridos en una amplia gama de aplicaciones industriales.

El presente capítulo comprende la revisión de tres exudados de plantas: goma arábiga (*Acacia senegal*), goma de mezquite (*Prosopis spp*) y goma tragacanto (*Astragalus spp*), como aditivos crioprotectores y estabilizantes de masas congeladas para panificación.

PALABRAS CLAVE: *Acacia*, almacenamiento congelado, *Astragalus*, exudados de plantas, goma arábiga, goma de mezquite, goma tragacanto, masa congelada, polisacáridos, *Prosopis*.

INTRODUCCIÓN

Desde principios de la década de los setenta, la industria panadera ha presentado una constante evolución relacionada con el desarrollo de nuevos productos y tecnologías para satisfacer las necesidades cambiantes del consumidor. La tecnología de congelación de masas ha mostrado un desarrollo revolucionario ya que beneficia tanto a los consumidores como a la industria panadera. A los consumidores, les ofrece opciones diversificadas de productos de masa congelada, disponibles en poco tiempo con las características organolépticas de un producto “recién horneado” y de calidad constante (Omedi *et al.*, 2019; Zhu, 2021).

Sin embargo, la congelación y el almacenamiento a bajas temperaturas impactan de forma negativa en la calidad de la masa, al causar una serie de alteraciones fisicoquímicas en sus componentes principales. Dentro de las alteraciones en la masa se destaca la reducción de la capacidad fermentativa y la viabilidad de las células de levadura, la disminución de la integridad de la red de gluten y el aumento en la velocidad de retrogradación del almidón. Lo anterior, disminuye la calidad de los productos finales, pues se obtienen productos con volumen reducido y vida de anaquel corta en comparación con los de masa sin congelar (Luo *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2015).

Los principales factores causantes de los fenómenos fisicoquímicos que presentan las masas congeladas se relacionan en su mayor parte con la cristalización del hielo durante la congelación y su posterior recristalización durante el almacenamiento congelado, además de la forma física de los cristales. Las estrategias tecnológicas para aminorar estos fenómenos se han enfocado en controlar la nucleación y el crecimiento de los cristales de hielo, ya sea modificando las condiciones de congelación o usando aditivos crioprotectores. En este sentido, se ha investigado el efecto de adicionar emulsionantes, enzimas y ésteres de sacarosa a la fórmula. Sin embargo, en los últimos años la industria de las masas congeladas ha mostrado mayor interés en estudiar el efecto de la incorporación de proteínas anticongelantes, proteínas estructurantes de hielo, agentes de nucleación e hidrocoloides (Ke *et al.*, 2021; Omedi *et al.*, 2019)

Los hidrocoloides, por su alta afinidad por el agua, forman complejos con el gluten y el agua de la masa congelada, lo que aumenta la

capacidad de retención de agua y minimizan su migración en la masa. Lo anterior influye en la mejora de las características de la masa, la calidad y la estabilidad del producto final. Cabe señalar que la efectividad del hidrocoloide depende de su estructura química, propiedades fisicoquímicas, concentración utilizada y condiciones del proceso de congelación (Ferrero, 2017).

Los exudados de las plantas de las zonas áridas son hidrocoloides o gomas protagonistas en estudios sobre el mejoramiento de la calidad de masas congeladas, principalmente la goma arábica, y en menor medida, la goma tragacanto. Una alternativa que podría llegar a reemplazar a la goma arábica y tragacanto es la goma de mezquite. Aunque los estudios sobre el tema son escasos, se ha demostrado que es un excelente estabilizante para masas congeladas (Armenta-Aispuro, 2019).

El presente capítulo aborda el efecto protector que presentan los exudados de plantas (goma arábica, tragacanto y mezquite) ante el deterioro por congelación en los principales componentes de la masa.

TECNOLOGÍA DE MASAS CONGELADAS

El creciente interés del mercado por los productos de panadería congelados ha sido impulsado principalmente por la demanda de los consumidores, los cuales prefieren productos de fácil acceso y recién horneados, cuyas cualidades sean comparables con los de masa fresca. Por lo anterior, la industria ha tenido que adaptarse rápidamente para hacer frente a estas solicitudes. Para el fabricante, el almacenamiento congelado extiende en gran medida la vida útil de la masa, lo que permite expandir sus ventas de un mercado local a uno nacional. Además, tiene la ventaja económica de ser un proceso de fabricación y distribución centralizado, así como de estandarización de la calidad del producto (Akbarian *et al.*, 2015).

La masa es un sistema complejo que se compone principalmente por una red de gluten que actúa como una columna vertebral, la cual interactúa con gránulos de almidón, otros polisacáridos (p. ej. arabinosanos), agua, sacarosa, sal, grasa y otros componentes. En conjunto, estas interacciones generan productos de panadería con cualidades sensoriales características del pan recién horneado, una miga suave que mantiene la

elasticidad y masticabilidad, además de una corteza firme, delgada y ligeramente dorada en su exterior (Dong y Karboune, 2021; Feng *et al.*, 2020).

Es bien conocido que la congelación y el almacenamiento a bajas temperaturas conduce a una inestabilidad en la masa, la cual se expresa como pérdida de retención de gas durante la fermentación, reducción del volumen final de la hogaza de pan y alteración de las propiedades texturales. Tales cambios se asocian con la incapacidad fermentativa de la levadura y la reducción de la integridad de la red de gluten, provocada por sustancias reductoras de las células muertas de la levadura (glutación), y con la formación y recristalización de cristales de hielo. Estos fenómenos varían con el tipo de producto de masa congelada, ya sean panecillos dulces, pan de barra, masa para pizza o masas congeladas cocidas al vapor (Wang *et al.*, 2014).

La calidad del producto final de masa congelada también es influida por la formulación de la masa y los parámetros de procesamiento, como el tiempo de mezclado de la masa, la velocidad, la temperatura y el tiempo de almacenamiento en congelación. Estudios recientes se han enfocado en la modificación del proceso de congelación usando ultrasonido o condiciones de vacío, y han obtenido hogazas de pan con mayor volumen específico y suavidad. Lo anterior se ha atribuido a la reducción de los cambios conformacionales en los componentes del gluten y a la reducción en la movilidad del agua (Akbarian *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019; Shao *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020).

Como ya se ha mencionado antes, la velocidad de congelación afecta seriamente la calidad final del producto congelado. Una alta velocidad de congelación ($-1.75^{\circ}\text{C}/\text{min}$) permite la formación de cristales de hielo pequeños y homogéneos, los cuales no afectan la integridad de la red de gluten. No obstante, la congelación rápida compromete la viabilidad de la levadura. La velocidad de congelación lenta ($-0.14^{\circ}\text{C}/\text{min}$) genera cristales de hielo de mayor tamaño y heterogéneos, que se han relacionado con el deterioro de la red de gluten, pero no dañan la viabilidad celular de la levadura. Por lo anterior, es necesaria una velocidad de congelación adecuada para garantizar la viabilidad de la levadura y al mismo tiempo asegurar la formación de pequeños cristales de hielo para proteger la estructura de la masa (Akbarian *et al.*, 2015).

En la masa congelada, el agua se encuentra en tres estados, a saber, agua rígida, confinada y congelable. Estas fracciones de agua se redistribuyen de manera diferente a través de la cristalización del hielo y la recristalización durante el almacenamiento. En específico, el aumento del contenido de agua congelable provoca cambios en la distribución de esta en la masa, por lo que el agua tiene menos contacto con las proteínas y el almidón, lo que provoca la destrucción del sistema de masa congelada (Luo *et al.*, 2018). Por todo lo anterior, es importante el control del estado del agua durante el proceso de congelación y su posterior almacenamiento a bajas temperaturas.

CAMBIOS ESTRUCTURALES EN GLUTEN POR EFECTO DE LA CONGELACIÓN

El gluten está formado por dos grupos de proteínas: gluteninas y gliadinas. Las gluteninas son proteínas poliméricas insolubles en agua, pero solubles en ácidos y álcalis diluidos; están formadas por múltiples cadenas de péptidos unidos por enlaces de disulfuro intermoleculares. Las gliadinas son proteínas monoméricas solubles en etanol al 70%. Las gliadinas se clasifican en subgrupos según sus diferentes estructuras primarias: alfa, beta, gamma y omega (α , β , γ y ω), y se dividen en subunidades de alto y bajo peso molecular. El gluten de trigo contiene una gran cantidad de aminoácidos, como prolina, leucina, prolamina, glutamina y, en menor proporción, cisteína. Su peso molecular varía ampliamente de alrededor de 30 000 a más de 10 000 000 Da (Wang *et al.*, 2015; Wieser, 2007).

El gluten es una red tridimensional viscoelástica que se forma durante el amasado, al interaccionar las gliadinas y las gluteninas con el agua, por medio de enlaces de hidrógeno e interacciones hidrófobas. Las gliadinas hidratadas contribuyen a la viscosidad y extensibilidad de la masa, y las gluteninas hidratadas, por su parte, son responsables de la fuerza y elasticidad. En conjunto, imparten las propiedades viscoelásticas de la masa y, posteriormente, el volumen y la calidad del producto final (Li *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015).

No todas las partes de las moléculas de proteínas absorben agua en la misma medida. En particular, las gluteninas tienen dominios con

propiedades más hidrófobas o más hidrófilas. Durante un periodo de reposo después de la mezcla, se ha observado un desplazamiento del agua de dominios hidrófobos a hidrófilos. Esta redistribución del agua aumenta durante la congelación. Parte del agua de la masa se transforma en pequeños cristales de hielo; y cuando la masa se descongela y los cristales de hielo se derriten, la distribución del agua es más desigual que antes de la congelación. Esta redistribución del agua es en gran parte responsable de la menor resistencia de la masa descongelada (Sluimer, 2005).

La congelación y el almacenamiento a bajas temperaturas afectan de forma negativa la composición y estructura del gluten. Principalmente, se presentan cambios conformacionales irreversibles en la estructura secundaria de las proteínas, se reduce la estructura de la hélice α y se convierte a estructuras específicas de hoja β y giro β ; así, los restos hidrófobos son expuestos y se propicia una estructura desordenada y menos estable térmicamente (Wang *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015).

Durante el almacenamiento congelado, el peso molecular de la proteína del gluten disminuye de forma notable, lo cual está asociado con una disminución en los agregados de proteína de la subunidad de glutenina de alto peso molecular (88,700-129,100 Da), por efecto de la ruptura de los enlaces disulfuro que ocasiona la despolimerización de la proteína.

Hay estudios que relacionan la ruptura de los enlaces disulfuro con la liberación de las enzimas proteolíticas y del agente reductor natural (glutión), de las células de levaduras muertas, que modifican la estructura de las proteínas del gluten. El estado estructural de los enlaces disulfuro controla la distribución de la masa molecular de la glutenina, que es uno de los factores que determinan la calidad de la masa y del producto final de panadería (Cauvain, 2007; Feng *et al.*, 2020; Ribotta *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2014).

EFFECTO DE LA CONGELACIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL ALMIDÓN

El almidón es el componente mayoritario en las masas (50-65%); estructuralmente, está compuesto por dos moléculas de diferente estructura química, amilosa y amilopectina. En lo macromolecular, se compone de

dos tipos de gránulos A y B, que se clasifican de acuerdo con su forma y tamaño; $> 10 \mu\text{m}$ y $< 10 \mu\text{m}$, de manera respectiva. Contienen fracciones muy pequeñas de proteínas, lípidos y fósforo. Las características de tamaño de los gránulos tienen fuerte influencia en las características tecnológicas de panificación, así como las propiedades térmicas de gelatinización y retrogradación (Tao *et al.*, 2016).

Las temperaturas de congelación y almacenamiento causan transformaciones microestructurales irreversibles en los gránulos de almidón. Se sabe que causan daños que repercuten negativamente en la textura de los productos finales horneados. Los gránulos de almidón tipo B son más sensibles a la congelación y presentan superficies ásperas e incompletas en comparación con el tipo A, en el que su forma se mantiene estable después de ocho semanas de almacenamiento en congelación. Lo anterior se ha atribuido a que la superficie específica de los gránulos tipo B es más grande y está rodeada por más cantidad de agua, que durante la congelación y el almacenamiento se convierte en un mayor número de cristales de hielo. Estructuralmente, se produce una disminución del estado amorfo y aumenta la cristalinidad (Yang *et al.*, 2019).

Otro aspecto que se debe considerar es el contenido de almidón dañado, el cual aumenta durante la congelación y el almacenamiento, lo que conduce a un aumento en la capacidad de absorción de agua, lo que a la postre hace que el agua migre fuera de la matriz de gluten (Ma *et al.*, 2016).

Por lo anterior, el control de la formación de cristales de hielo y su estabilidad se ha convertido en uno de los desafíos más serios para la industria de la masa congelada.

ADITIVOS CRIOPROTECTORES O ESTABILIZANTES EN MASAS CONGELADAS

El paso más importante para minimizar el daño causado a la estructura de la masa congelada es controlar la nucleación y recristalización del hielo. Además del control de las condiciones de congelación (velocidad y tiempo), diversas estrategias tecnológicas se han enfocado en la incorporación de proteínas anticongelantes, agentes nucleadores de hielo e hidrocoloides (Ke *et al.*, 2021; Omedi *et al.*, 2019).

Las proteínas anticongelantes son compuestos polipeptídicos sintetizados por varios organismos como peces, plantas o insectos para permitir que sus células sobrevivan a temperaturas de congelación. Estos compuestos disminuyen cinéticamente la temperatura a la que crece el hielo de manera no coligativa; por tanto, exhiben histéresis térmica. Lo anterior significa que reducen la temperatura de congelación, inhiben la recristalización del hielo y previenen el gran crecimiento de cristales de hielo asociado con la recristalización durante el almacenamiento congelado y la descongelación (Knight *et al.*, 1991; Ustun y Turhan, 2015).

En masas congeladas, se ha investigado el efecto de proteínas anticongelantes de avena (*Avena Sativa L.*), cebada (*Hordeum vulgare L.*) y recientemente de zanahoria (*Daucus carota*). En general, las proteínas anticongelantes de origen vegetal disminuyen el contenido de agua congelable y restringen su movilidad y distribución durante el almacenamiento en congelación. Además, aumentan la capacidad de fermentación de la levadura y mejoran las propiedades reológicas de la masa y la textura de los productos finales (Ding *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2015).

En cuanto a los agentes de nucleación de hielo, su función principal es controlar el tamaño, la forma y la agregación de los cristales de hielo. Se han probado en películas a base de zeína y de nucleadores de hielo biogénicos de *Erwinia herbicola*; ambos agentes nucleadores han presentado una mejora de la viabilidad de la levadura de masa congelada, lo que posteriormente aumenta el volumen específico de las hogazas de pan y disminuye la dureza (Shi *et al.*, 2013a; 2013b).

Sin embargo, a pesar de las mejoras que proporcionan las proteínas anticongelantes y los agentes de nucleación de hielo a la calidad de la masa congelada, su uso es limitado, sobre todo por los altos costos de extracción y bajos rendimientos. Por lo anterior, la mayoría de las investigaciones se han centrado en el estudio y aprovechamiento de hidrocoloides como mejoradores de masas congeladas, aunado a su amplia disponibilidad y procesos de extracción amigables y altos rendimientos.

Los hidrocoloides son polisacáridos de alto peso molecular provenientes de fuentes microbianas, animal y vegetal. En su estructura, poseen un gran número de grupos hidroxilo, por lo que son altamente solubles en agua. La aplicación dependerá de la estructura química y propiedades fisicoquímicas (Maity *et al.*, 2018).

Los polisacáridos de fuentes vegetales, entre ellos los exudados, han atraído la atención de los tecnólogos en alimentos para su aplicación en la tecnología de masas congeladas. Los exudados más estudiados y utilizados como mejoradores de la calidad de masas congeladas son las gomas: arabiga (*A. senegal*), karaya (*Sterculia* sp), tragacanto (*A.* sp), ghatti (*Anogeissus latifolia*) y, más recientemente, de mezquite (*P.* spp) (Armenta-Aispuro, 2019; Maity *et al.*, 2018).

Los exudados de plantas se agregan a la masa sin congelar para aumentar la retención de agua y retardar el envejecimiento, ya que tienen la capacidad de inducir cambios estructurales en los componentes principales de la masa. La adición de exudados a los productos congelados puede proporcionar estabilidad durante los ciclos de congelación-descongelación, forman complejos con las proteínas del gluten y minimizan la migración de la humedad en la masa. Lo anterior contribuye a minimizar los efectos negativos de la congelación y el almacenamiento congelado (Maity *et al.*, 2018).

La eficacia crioprotectora de los exudados en productos de masa congelados puede depender del tipo, la solubilidad, concentración, capacidad de retención de agua, las propiedades reológicas y su efecto sinérgico con otros ingredientes durante la congelación y el almacenamiento en congelación (Ferrero, 2017; Omedi *et al.*, 2019).

EXUDADOS DE PLANTAS EN MASAS CONGELADAS

Los exudados de plantas, conocidos también como gomas vegetales, son producidos por árboles del género *Acacia*, *Astragalus* y *Prosopis*, entre otros. La exudación es un fenómeno de defensa natural que se favorece en condiciones de estrés físico-ambiental, como clima cálido y seco, por el ataque de insectos o por cortes o incisiones en tronco o ramas. El exudado cubre la herida y adquiere una consistencia semisólida para prevenir la infección o la pérdida de agua en el área afectada de la planta. El exudado o goma adquiere una forma de nódulo, lágrima o listón que varía de un ligero color amarillo (goma arábica), café claro a oscuro (gomas arábica y tragacanto) y café claro a rojo ámbar (goma de mezquite). La cantidad de exudación o producción de goma dependerá de

las condiciones ambientales, del suelo, de la especie y de la edad del árbol (López-Franco *et al.*, 2012).

La producción de goma arábiga y tragacanto requiere la inducción de la exudación por incisiones o cortes, recolección, clasificación, empaquetado y envío a los productores de la goma. En el caso de la goma de mezquite, su producción abarca sólo aquella que se exuda de forma natural, recolección y venta en el comercio informal.

GOMA ARÁBIGA

La goma arábiga se obtiene de árboles del género *Acacia*, principalmente de *A. senegal*, que crecen en las zonas áridas de África. Sudán es el principal productor de goma arábiga, abarcando más del 90% de la oferta del mercado mundial. La goma de *A. senegal* actualmente es reconocida como un aditivo alimentario con múltiples propósitos (E414) (Howes, 1949; Kennedy *et al.*, 2012).

Estructura química, características físicoquímicas y funcionalidad tecnológica

La goma arábiga de *A. senegal* se compone de ~3.8% de cenizas, 0.34% de nitrógeno, 0.24% de metoxilo, 17% de ácido urónico; después de una hidrólisis ácida, la composición de monosacáridos es 45% galactosa, 24% arabinosa, 13% ramnosa, 16% ácido glucurónico y 15% ácido 4-O-metil glucurónico. Además, tiene unida de forma covalente una fracción de polipéptido de alrededor del 2%. La goma arábiga es un polisacárido complejo que contiene pequeñas cantidades de calcio, magnesio y sales de potasio (Anderson *et al.*, 1990).

Por medio de cromatografía de interacción hidrofóbica, se han identificado tres fracciones principales: arabinogalactano (AG), complejo de arabinogalactano-proteína (AGP) y glicoproteína (GI). Estos componentes representan 88, 10 y 1% de la molécula, y contienen 20, 50 y 30% de los polipéptidos, respectivamente. La proteína se encuentra en el exterior de la unidad AGP. La conformación general de la molécula de goma

arábiga se describe mediante el modelo de retoño en flor, en el que aproximadamente cinco bloques de AG con $\sim 200\ 000$ Dalton cada uno, que están dispuestos a lo largo de una cadena de polipéptido que puede contener hasta 1 600 residuos de aminoácidos (Anderson *et al.*, 1990; Connolly *et al.*, 1987).

La goma arábica es altamente soluble en agua fría o caliente, llegándose a producir soluciones concentradas hasta en un 50% (p/p). Las soluciones de goma tienen un color amarillo claro a naranja-café, con un pH de 4.5. A diferencia de otros polisacáridos, la goma arábica no confiere alta viscosidad a bajas concentraciones, por lo que las soluciones sólo se vuelven viscosas a concentraciones superiores al 30%. Lo anterior se debe principalmente a la estructura altamente ramificada de la goma, que da lugar a moléculas compactas con un volumen hidrodinámico relativamente pequeño (15.2 nm) (Gashua *et al.*, 2015; Idris y Haddad, 2011).

La goma arábica tiene excelentes propiedades nutricionales, de superficie, estabilizantes y emulsificantes. Las emulsiones agua-aceite formuladas con goma arábica son estables en un amplio rango de pH y son aún más estables cuando se incorporan sales de sodio. Sin embargo, el calentamiento prolongado puede ocasionar la desnaturalización y precipitación de la proteína, lo que conlleva a una reducción de la capacidad emulsificante y de la viscosidad (Barak *et al.*, 2020; Idris y Haddad, 2011).

La goma arábica se puede utilizar en una variedad de aplicaciones debido a sus propiedades funcionales. En la industria de alimentos, se utiliza como emulsionante y encapsulación de sabores cítricos; en confitería, para retrasar la cristalización del azúcar y emulsionante de los componentes grasos. También se utiliza para hacer caramelos blandos, los cuales contienen un 50% menos de azúcar en comparación con los caramelos duros. Debido a su baja viscosidad y alta solubilidad en agua, así como a su propiedad estabilizante, la goma arábica se utiliza en productos de panadería, sobre todo en la elaboración de glaseados y coberturas para panes, pasteles y galletas. Aunado a lo anterior, se ha probado la efectividad de la goma arábica en comparación con otros hidrocoloides sobre la calidad de masas congeladas (Sharadanant y Khan, 2003a, 2003b, 2006; Whistler, 1993).

Efecto de la goma arábica en masas congeladas

La goma arábica es el exudado más utilizado en la industria, principalmente como emulsionante y estabilizante. En las masas frescas, su utiliza como mejorador de la mezcla y alargador de la vida de anaquel, mediante la conservación de humedad de los productos horneados. Las investigaciones de goma arábica en masas congeladas se han enfocado en su efecto como aditivo mejorador de las características de calidad del pan (Li *et al.*, 2019; Williams y Phillips, 2021)

Se ha demostrado que la goma arábica aumenta el volumen específico de la hogaza de pan de masa sin fermentar y de pan precocido congelado. El aumento del volumen específico se ha atribuido al aumento de viscosidad en la masa, que ralentiza la difusión del gas y permite su retención durante las primeras etapas de horneado. El aumento de viscosidad se relaciona con la estructura muy ramificada de la goma arábica, que hace que la masa tenga una mejor capacidad de retener el complejo gluten-almidón (Liu *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020; Salehi, 2020).

La goma arábica es considerada un polielectrolito, con grupos cargados eléctricamente debido a la presencia de numerosos grupos hidroxilo. Actúa como barrera frente a la reducción del contenido de agua, promoviendo la absorción de ésta y reduciendo su movilidad (Liu *et al.*, 2020).

La humedad del pan afecta la suavidad de la miga, la dureza de la corteza y la vida útil del producto. Recientemente, Liu *et al.* (2020) reportaron que la adición de goma arábica al 0.6% en una masa precocida congelada retiene la humedad en la miga de pan, lo cual reduce la migración de la humedad hacia la corteza y, por consiguiente, retrasa el envejecimiento o endurecimiento. Tavakoli *et al.* (2017) reportaron que la adición de goma arábica al 3% aumentó la humedad del pan y retrasó su envejecimiento hasta cuatro días. Este efecto se lo han atribuido al incremento de los enlaces hidrófilos entre las moléculas de agua y la amilosa, durante la descongelación.

El cambio en la textura es la característica más significativa del envejecimiento del pan. El movimiento del agua durante la congelación reduce la elasticidad de la masa y aumenta la dureza del pan. La goma arábica al 0.6% reduce la dureza del pan y retrasa la disminución de la elasticidad. La extensibilidad y la dureza se relacionan con las propiedades viscoelásticas de la masa (Liu *et al.*, 2020).

El comportamiento viscoelástico de la masa de trigo se puede conocer mediante ensayos de oscilación dinámica en un reómetro. Recientemente, en nuestro grupo de trabajo se midió el efecto de la concentración de goma arábica sobre los atributos elásticos (G') y viscosos (G'') del gluten aislado de la masa congelada. La masa de harina de trigo se elaboró con una solución acuosa de goma, a tres niveles de concentración (0, 0.5 y 1.0% p/p), se congeló, y el gluten se extrajo de la masa descongelada. El gluten formado con goma mostró un aumento de G' y una disminución de G'' , y el efecto de la concentración fue estadísticamente significativo ($p \leq 0.05$) (cuadro 1). El efecto de la goma sobre el carácter de la deformación en el rango lineal ($\tan \delta$) del gluten indicó que la deformación es esencialmente elástica y recuperable, ya que mostró valores de $\tan \delta < 1$ (Ferry, 1980). La concentración 0.5% (p/p) de goma arábica causó que el gluten descongelado mostrara un equilibrio de los atributos elásticos y viscosos con un valor de $\tan \delta = 0.5$. Lo anterior sugiere que los cambios de la estructura de la red de gluten por efecto de la congelación dependen de la concentración de la goma arábica. Pero el tipo de interacciones gluten/goma/agua responsables de los cambios reológicos necesitan ser estudiados.

El efecto de la goma arábica en la cinética de la congelación del gluten de trigo se ha estudiado muy poco. Armenta-Aispuro (2019), en un congelador estático a -18°C , observó que el aumento de la concentración de la goma arábica adelantó el inicio de la congelación del gluten (B) y de la finalización de la fase de congelación (C), lo que indica un aumento de la velocidad de eliminación del calor latente (figura 1). Este efecto también acortó la etapa de congelación (B-C) y de la etapa para alcanzar la temperatura del medio de enfriamiento (C-D). Esto podría deberse a la capacidad de la goma de retener agua, lo que maximiza la cantidad de fase líquida en el gluten congelado.

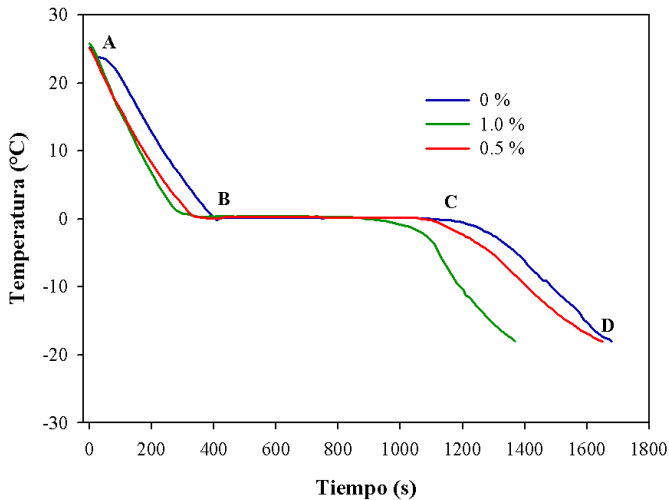
Una teoría para explicar el efecto de la goma arábica en la congelación del gluten es que, al ser una molécula hidrófila, retiene agua en su estructura, que durante el cambio de fase de líquido a sólido se encuentra menos disponible para ser congelada. La indisponibilidad del agua para congelar es benéfico, ya que, entre menos agua congelada, el daño que causan los cristales de hielo a las células de levadura es menor y, por tanto, es menor la liberación de las enzimas proteolíticas y del agente reductor natural (glutatión) de los enlaces disulfuro.

CUADRO 1
EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE GOMA ARÁBIGA EN LOS PARÁMETROS
REOLÓGICOS DEL GLUTEN AISLADO DE MASA CONGELADA

Concentración de goma arábica (%)	Módulo elástico (G') (Pa)	Módulo viscoso (G'') (Pa)	Tan δ (G''/G')
0%	6248.7 ± 79.0 ^a	4156.5 ± 38.7 ^a	0.66 ± 0.00 ^a
0.5%	3589.2 ± 120.0 ^c	1863.5 ± 94.6 ^c	0.52 ± 0.00 ^b
1.0%	4490.5 ± 315.7 ^b	3201.6 ± 98.4 ^b	0.71 ± 0.02 ^a

Los valores corresponden a las medias ± desviación estándar (n = 2). Una letra diferente en la columna representa diferencias significativas entre las concentraciones de goma arábica (p ≤ 0.05) (Comparación de medias por Tukey) (Datos no publicados obtenidos en el grupo de trabajo en 2019).

FIGURA 1



Curva de congelación de gluten formado con agua y solución de goma arábica. A-B = fase de enfriamiento inicial, B-C= fase de congelación y C-D= enfriamiento adicional
Fuente: Armenta-Aispuro (2019).

GOMA DE MEZQUITE

Mezquite es un nombre común que se le da a los árboles del género *Prosopis* que están distribuidos en las regiones áridas y semiáridas del mundo. El árbol crece principalmente en América del Norte, América

del Sur, África del Norte y Asia Oriental.

La recolección de la goma de mezquite se hace de forma manual entre los meses de mayo y junio, y se expende en pequeña escala en algunas localidades de México. La goma de mezquite ha sido aprobada como coadyuvante en alimentos, bebidas y suplementos alimenticios por la Secretaría de Salud de México (SSA) desde 2006 (*Diario Oficial de la Federación*, <https://www.dof.gob.mx>).

Estructura química, características fisicoquímicas y funcionalidad tecnológica

La goma de mezquite clarificada presenta una composición química de 10% de humedad, 2.7% ceniza, 0.46% taninos, 4.6% proteína, 96% azúcares totales, de los cuales 71% son de arabinosa, 26% galactosa y 3% ácidos urónicos. Sin embargo, al igual que en otras gomas, esta composición puede variar según la especie y variedad de mezquite (López-Franco *et al.*, 2008; 2004).

La goma de mezquite es un polisacárido altamente ramificado con residuos de L-Ara, D-Gal y 4-O-metil-D-glucurónico. Después de la hidrólisis ácida parcial, las cadenas centrales internas de la goma de *P. juliflora* contienen residuos de D-Gal unidos por enlaces β -D (1 \rightarrow 3) y/o β -D (1 \rightarrow 6) y residuos de ácido glucurónico y ácido 4-O-metil-D-glucurónico unido a D-Gal por enlaces α -D- (1 \rightarrow 4) y β -D- (1 \rightarrow 6) como grupos terminales. Aunado a lo anterior, tiene oligosacáridos complejos que contienen L-Ara, los cuales forman cadenas periféricas lábiles a los ácidos (Aspinall y Whitehead, 1970a, 1970b).

El arabinogalactano de la goma de mezquite (*P. velutina*) contiene un polisacárido con núcleo de galactano compuesto de ácido glucurónico y D-Gal. La ramificación está formada por la unión de oligómeros L-Ara de hasta diez residuos de azúcar al ácido glucurónico, como lo revela la identificación de GlcUA-Ara1-10 por MALDI-TOF MS. Además, están presentes pequeñas cantidades de otros azúcares, como D-Man, D-Glc y D-Xyl. Aunado al componente polisacárido, la goma presenta una fracción proteica que oscila entre 3 y 7%, y de 0.3 a 2% de compuestos fenólicos (López-Franco *et al.*, 2012; 2008).

Por medio de cromatografía de interacción hidrofóbica, la goma de

mezquite (*P. velutina*) fue fraccionada en tres componentes principales: arabinogalactanas (AG), arabinogalactanas proteicas (AGP) y glicoproteínas (GP), representando 94.7, 3.6 y 1.6% del total de la molécula. Estas fracciones difieren en contenido de proteína, dimensiones macromoleculares y propiedades de superficie (López-Franco *et al.*, 2004).

Hasta el momento no se ha reportado un modelo que explique la estructura terciaria de la goma de mezquite. Sin embargo, López-Franco *et al.* (2004), mediante estudios de dispersión de luz, demostraron que la goma de mezquite (*P. velutina*) con un peso molecular de $386\ 000\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, un radio de giro (R_G) de 50.47 nm y un radio hidrodinámico (R_H) de 9.48 nm, se asemeja a una estructura de espiral polidisversa, similar a la reportada para las AGP de goma arábica (López-Franco *et al.*, 2004; Qi *et al.*, 1991).

Las propiedades físico-químicas más importantes de la goma de mezquite son su color, que no tiene olor, sabor ligeramente astringente, alta solubilidad en agua y baja viscosidad. La goma de mezquite es muy soluble en medios acuosos por encima del 50% (p/p) e insoluble en solventes orgánicos. Las soluciones acuosas de esta goma varían de un color amarillo claro hasta un color café marrón. Estas diferencias en color dependen de la concentración y de la especie. El pH de las soluciones se encuentra en un rango de 4.5-5. Al igual que la goma arábica, la goma de mezquite no confiere alta viscosidad a bajas concentraciones. Soluciones de goma de mezquite a una concentración de 20% (p/p), presentan un comportamiento newtoniano; pero a una concentración de 50%, las soluciones son claramente no-newtonianas (Armenta-Aispuro, 2019; Goycoolea *et al.*, 1995; López-Franco *et al.*, 2012; Rinaudo *et al.*, 2008).

Por sus componentes de carbohidrato y proteína, la goma de mezquite se considera como una molécula anfifílica, lo que la convierte en un polímero con actividad en la superficie (tensoactivo). La concentración de goma y el pH de la solución son los factores más importantes que influyen en esta propiedad. La goma de mezquite tiene la capacidad para formar y estabilizar emulsiones aceite en agua con un diámetro medio de la gota de $2.5\ \mu\text{m}$ a $3.0\ \mu\text{m}$ con una estabilidad del tamaño de partícula por hasta 100 h (Acedo-Carrillo *et al.*, 2006).

Además de su capacidad para formar emulsiones, la goma de mezquite se ha utilizado en la formación de películas para regular la humedad y migración de gases, y para encapsular aceites esenciales, saborizantes, colorantes por la técnica de secado por aspersion (Beristain

y Vernon-Carter, 1995; Villagómez-Zavala *et al.*, 2008).

En panificación, el uso de la goma de mezquite es muy escaso; sólo existe el reporte de Armenta-Aispuro (2019), donde se estudió el efecto de las interacciones agua-goma de mezquite-harina en la congelación y descongelación del gluten.

Efecto de la goma de mezquite sobre la velocidad y tiempo de congelación del gluten

Dos formas en la que se puede controlar la velocidad de formación de los cristales de hielo son con la adición de agentes protectores o hidrocoloides, y con el control de la velocidad de congelación. Estos tipos de estudios de la congelación del gluten son muy escasos. Armenta-Aispuro (2019) observó que la adición de goma de mezquite al 0.5% reduce el tiempo de congelación del gluten y aumenta la velocidad de congelación, en contraste con 0.0 y 1.0% (p/p) (cuadro 2). Esto se relacionó con la posible capacidad de la goma de mezquite de redistribuir el agua en las proteínas del gluten durante el enfriamiento, siendo agua que no se congela. El aumento de la velocidad de congelación puede promover la generación de cristales de hielo pequeños y de su distribución uniforme en la masa, lo que pudiera contribuir a la mínima pérdida de calidad en los productos horneados (Akbarian *et al.*, 2015).

Efecto de la goma de mezquite en los parámetros viscoelásticos del gluten

La distribución del agua durante el amasado y la redistribución durante la congelación y descongelación de la masa es en gran parte responsable del comportamiento reológico de la masa descongelada. El grado de interacción entre las proteínas formadoras del gluten durante el amasado determina la propiedad viscoelástica del gluten. El efecto de la concentración de la goma de mezquite (0.5 o 1.0%) sobre esta propiedad reológica fue estudiada recientemente por Armenta-Aispuro (2019) (figura 2). Se observó que la adición de goma de mezquite al 0.5% mantiene el equilibrio de las propiedades viscoelásticas del gluten ($\text{Tan } \delta$) después de ser

congelado (cuadro 2), lo cual supone que una baja concentración de goma de mezquite provee un efecto crioprotector de la integridad de la red de gluten durante la congelación (Armenta-Aispuro, 2019; Sluimer, 2005).

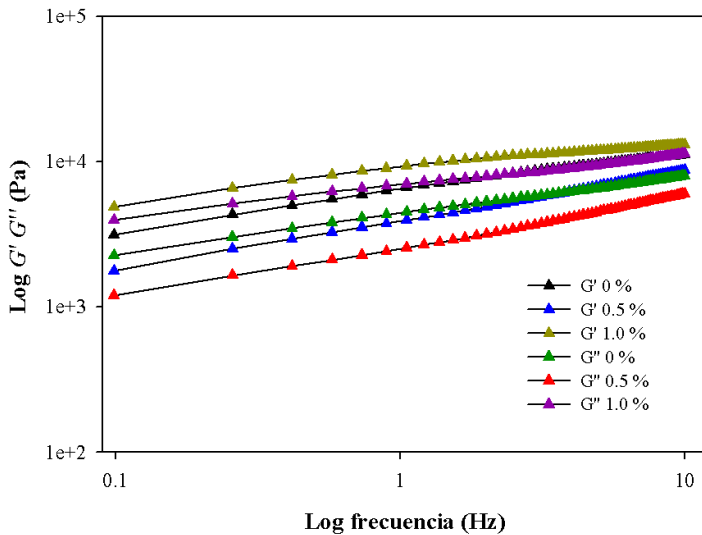
CUADRO 2

EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE GOMA DE MEZQUITE EN LOS PARÁMETROS DE CONGELACIÓN Y REOLÓGICOS DE GLUTEN CONGELADO

Concentración de goma de mezquite (%)	Tiempo de congelación (segundos)	Velocidad media de congelación (°C / min)	$Tan \delta$
0%	610 ± 14 ^a	1.6 ± 0.01 ^b	0.52 ± 0.20 ^a
0.5%	580 ± 14 ^b	1.7 ± 0.01 ^a	0.51 ± 0.10 ^a
1.0%	610 ± 14 ^a	1.6 ± 0.03 ^b	0.64 ± 0.10 ^a

Los valores corresponden a las medias ± desviación estándar (n = 3). Una letra diferente en la columna representa diferencias significativas entre las concentraciones de mezquite ($p \leq 0.05$) (Comparación de medias por Tukey) (Armenta-Aispuro, 2019).

FIGURA 2



Curvas de barrido de frecuencia para G' (módulo elástico) y G'' (módulo viscoso) de gluten con goma de mezquite aislado de masa congelada (Armenta-Aispuro, 2019).

Fuente:

Efecto sobre la cristalización y fusión del hielo en gluten

El efecto de la goma de mezquite se investigó en el ciclo de congelación y descongelación del gluten. En el estudio de Armenta-Aispuro (2019), se observó que la adición de goma de mezquite al 0.5% reduce el tiempo de congelación del gluten. De igual manera, la velocidad de congelación aumenta con respecto al gluten sin goma (cuadro 2). El aumento de la velocidad de congelación puede promover la generación de cristales de hielo pequeños distribuidos de manera uniforme en la masa, durante el cambio de estado del agua (Armenta-Aispuro, 2019).

GOMA DE TRAGACANTO

La goma de tragacanto es un exudado obtenido de pequeños arbustos de la especie *Astragalus*. Existen alrededor de 2 000 especies de *Astragalus* en el suroeste de Asia, siendo *A. gummifer* y *A. microcephalus* las fuentes principales de la goma tragacanto. Los principales productores de esta goma son Irán y Turquía, y los productores menores Afganistán y Siria. La goma se puede obtener de forma espontánea o por medio de incisiones en el tallo inferior de la planta. Las condiciones climáticas más favorables para la producción de la goma son lluvias abundantes antes de la extracción y un ambiente árido durante el tiempo de recolección. La goma tragacanto, por su obtención, se puede clasificar en cinta o en escamas, siendo la primera la que tiene una calidad superior en comparación con la segunda. Los parámetros utilizados para definir la calidad de la goma son viscosidad, color y bajas cargas microbianas. Desde 1961, la goma tragacanto ha sido aprobada como aditivo en alimentos por la Food and Drug Administration (FDA) y la European Food Safety Authority (EFSA) (Anderson, 1989; Verbeken *et al.*, 2003; Whistler, 1993).

Estructura química, características fisicoquímicas y funcionalidad tecnológica

La composición química de la goma de tragacanto varía dependiendo de la especie y de las condiciones de cultivo de la planta. Se ha reportado

de 8.79 a 12.94% de humedad, 1.8 a 3.2% de cenizas, 0.3 a 3.82% de proteína y de 83.81 a 86.52% de carbohidratos (Nejatian *et al.*, 2020).

La goma tragacanto está compuesta por dos fracciones: una fracción soluble en agua y altamente ramificada (30-40%) llamada tragacantin que contiene azúcares como L-Ara, L-Fuc, D-Man, D-Glc, D-Gal y D-Xil; y una fracción insoluble pero hinchable en agua (60-70%) llamada basorin, que contiene L-Fuc, D-Xil, ácido D-Gal, D-Gal y L-Ram (López-Franco *et al.*, 2021; Wang, 2000).

La goma de tragacanto se procesa en polvo y, dependiendo de su forma (cinta o escama), presenta diferencias significativas en sus características físicas. La forma de cinta produce un polvo de color blanco-amarillo claro, inodoro y de sabor suave. A diferencia de los polvos de goma procesados a partir de escamas que son de color cremoso a café claro. Las soluciones de goma tragacanto son de naturaleza ligeramente ácida y muestran un pH de 5-6. Estas soluciones son estables en un amplio rango de pH, por lo que se puede utilizar en productos con alta acidez. Cuando se dispersa en agua (caliente o fría), la goma tragacanto se hincha y da una solución coloidal de alta viscosidad, mientras que en disolventes orgánicos como el alcohol es insoluble (López-Franco *et al.*, 2021)

La viscosidad en solución acuosa es la característica más significativa de cualquier tipo de goma y refleja la calidad de ésta. La viscosidad de la solución de goma tragacanto aumenta al aumentar la concentración de goma. Dependiendo del grado comercial, la goma puede exhibir una viscosidad de hasta 3 500 cP a una concentración de 10 g·kg⁻¹. Esta alta viscosidad significa que puede servir como espesante y estabilizante. Las soluciones acuosas de tragacanto son generalmente termoestables; sin embargo, el tratamiento térmico prolongado puede provocar una pérdida permanente de viscosidad (Barak *et al.*, 2020; López-Franco *et al.*, 2021).

La goma de tragacanto también tiene la capacidad de reducir la tensión superficial del agua cuando se usa a bajas concentraciones (< 2.5 g·kg⁻¹); por lo tanto, se puede usar como un agente tensoactivo en varias aplicaciones (Glicksman, 1983).

Debido a su viscosidad y estabilidad al calor y al ácido, la goma tragacanto se ha utilizado en diversas industrias como emulsionante, espesante y estabilizante. Es un emulsionante eficaz debido a su doble comportamiento funcional, ya que aumenta la viscosidad de la fase

acuosa y, al mismo tiempo, reduce la tensión en la interfase aceite-agua en emulsiones (López-Franco *et al.*, 2021).

La goma tragacanto se utiliza como espesante en diversos productos alimenticios, como salsas, helados, gelatinas, aderezos para ensaladas, jarabes, dulces, mayonesa, etc. Cuando entra en contacto con agua, sus moléculas se hinchan y forman una red que atrapa a las moléculas de agua, por lo que estabiliza la fase acuosa y sérica de los productos alimenticios y aumenta la viscosidad de los productos. También se utiliza como aglutinante en productos de confitería (caramelos). En helado, se utiliza para obtener una textura suave; y durante el almacenamiento del helado, previene la formación de cristales de hielo a través de su doble función de viscosidad y actividad superficial. Estas propiedades lo convierten en un aditivo funcional en varios postres helados, como paletas, sorbetes, helados de agua, etc. Además, la goma tragacanto se puede usar en aderezos cremosos para ensaladas debido a su estabilidad ácida y durabilidad; y como espesante en varios tipos de salsas, además de como estabilizador en diversas emulsiones y coberturas de panadería (Barak *et al.*, 2020; Wang, 2000).

Efecto de la goma tragacanto en masa congelada

Las investigaciones del efecto de la goma tragacanto en masas congeladas, aunque son escasas, han dado resultados muy prometedores. Se ha encontrado un efecto positivo en las propiedades reológicas de la masa. La adición de goma tragacanto al 1% aumenta la capacidad de absorción de agua, el tiempo de desarrollo y estabilidad en la masa. El aumento de la capacidad de absorción de agua se ha atribuido a la gran cantidad de grupos hidroxilo en la goma tragacanto, que compiten por el agua con las moléculas de gluten durante el amasado. El valor de la estabilidad es indicativo de la fuerza de la harina y el incremento a valores más altos sugiere una masa más fuerte, lo que la vuelve apta para congelar (Gharaie *et al.*, 2015).

Efecto de la goma tragacanto en los parámetros reológicos y en los atributos sensoriales del pan de masa congelada

En general, adicionar 1% de goma tragacanto a la formulación de masas para congelar tiene efecto positivo en los parámetros reológicos de la masa fresca, además que en los productos horneados mejora sus atributos de calidad y aumenta su vida de anaquel. Lo anterior sugiere que la goma tragacanto podría llegar a controlar la cristalización y la recristalización del hielo durante el almacenamiento congelado. Sin embargo, es importante señalar que los estudios realizados al momento son en panes planos, los cuales no se caracterizan por tener volúmenes altos. Para evaluar la interacción de la goma tragacanto con el gluten y obtener un conocimiento más profundo, se recomienda realizar estudios reológicos en la masa descongelada, así como en productos con volumen específico más elevado por ejemplo en hogazas de pan.

La evaluación sensorial de los productos horneados de masas congeladas con goma tragacanto han presentado resultados positivos con respecto a sus características de calidad. La goma de tragacanto mantiene la firmeza y suavidad del pan plano “tipo pita” hasta tres semanas más en comparación con los panes sin goma. Además, mejora ligeramente el sabor y el aroma. El envejecimiento del pan se relaciona con la pronta retrogradación del almidón por efecto de la congelación. En el pan barbari o “persian flat bread” y el pan plano tipo pita, la goma de tragacanto al 1% mantiene la humedad hasta tres días en comparación con el pan sin goma, lo que aumenta la calidad sensorial del pan. Lo anterior es indicativo del efecto antienvjecimiento del polisacárido, al conservarse una miga suave y húmeda durante más tiempo (Gharaie *et al.*, 2015; Sheikholeslami *et al.*, 2017).

TENDENCIAS FUTURAS EN LA TECNOLOGÍA DE MASAS CONGELADAS

Con la creciente popularidad de los productos de masa congelada, las tendencias en investigación de masa congelada se han incrementado en los últimos años debido a que esta tecnología aún presenta retos

tecnológicos en la calidad de los productos horneados. Las investigaciones recientes se han enfocado en el uso de proteínas anticongelantes, agentes inhibidores de la nucleación de hielo y gomas o hidrocoloides.

Los exudados de plantas de zonas áridas (hidrocoloides), como las gomas arábica, tragacanto y de mezquite, presentan propiedades estabilizantes de la transición de fase del agua de masas congeladas.

Los estudios dirigidos al uso de polisacáridos provenientes de fuentes naturales no convencionales, cuya extracción y clarificación sea amigable con el ambiente y escalable a la industria alimentaria, son apremiantes para resolver problemas tecnofuncionales en los alimentos sin comprometer más la salud del ambiente. Los resultados obtenidos en los estudios realizados en nuestro grupo de investigación prevén que la goma de mezquite puede ser un aditivo estabilizador de la propiedad viscoelástica del gluten. Pero aún está en proceso el estudio de su efecto en las interacciones entre el almidón, el agua y los otros componentes responsables de la propiedad reológica de la masa.

CONCLUSIONES

La tecnología de congelación de masas sigue presentando retos para conseguir la calidad de los productos horneados, tales como alargar la vida de anaquel y obtener las características tecnológicas del pan, como el volumen y la textura que tiene el pan de masa fresca. Los estudios publicados indican que los hidrocoloides, dada su capacidad de reducir la pérdida de humedad, coadyuvan a estabilizar la estructura de la miga de pan y extender su vida de anaquel; función que depende de su capacidad de enlazar moléculas de agua y de sus interacciones con las proteínas formadoras del gluten.

La goma arábica es el exudado más utilizado como regulador de la movilidad del agua en la tecnología de masas congeladas. Los productos horneados adicionados con goma arábica presentan volúmenes específicos altos, retienen la humedad y tienen larga vida de anaquel. Por otro lado, la goma tragacanto aumenta la absorción de agua durante el amasado y, después de la congelación, mantiene la firmeza y suavidad del pan plano. El conocimiento del efecto de goma tragacanto en masas congeladas es

limitado, pero los resultados sugieren que tiene potencial para ser un excelente aditivo crioprotector. A pesar de los beneficios que presenta el uso de la goma arábiga y tragacanto en la tecnología de masas congeladas, su aplicación se ve afectada por la falta de seguridad en el suministro en el caso de goma de *Acacia*, y por los costos elevados de la goma tragacanto.

Por otro lado, los estudios con la goma de mezquite demuestran que tiene potencial para ser un aditivo mejorador de masas congeladas, ya que se observó que reduce el tiempo de congelación del gluten y, a concentraciones adecuadas, mantiene las propiedades viscoelásticas después de la descongelación.

La información provista en este capítulo permite concluir que la incorporación de las gomas exudadas de plantas son una opción viable para controlar la cristalización del agua durante la congelación, disminuir los efectos adversos durante el almacenamiento a bajas temperaturas y los defectos de calidad de los productos horneados, pero su efecto dependerá de las condiciones de congelación y de la estructura química del exudado.

REFERENCIAS

- ACEDO-CARRILLO, J., Rosas-Durazo, A., Herrera-Urbina, R., Rinaudo, M., Goycoolea, F., y Valdez, M. (2006). "Zeta potential and drop growth of oil in water emulsions stabilized with mesquite gum", *Carbohydrate Polymers*, 65(3), 327-336.
- AKBARIAN, M., Dehkordi, M. S. M., Ghasemkhani, N., Koladoozi, M., Niknam, O., y Morshedi, A. (2015). "Hydrocolloids and cryoprotectant used in frozen dough and effect of freezing on yeast survival and dough structure: a review", *International Journal of Life Sciences*, 9(3), 1-7.
- ANDERSON, D. (1989). "Evidence for the safety of gum tragacanth (*Asiatic Astragalus spp.*) and modern criteria for the evaluation of food additives", *Food Additives & Contaminants*, 6(1), 1-12.
- ANDERSON, D., Douglas, D. B., Morrison, N., y Weiping, W. (1990). "Specifications for gum arabic (*Acacia Senegal*); analytical data

- for samples collected between 1904 and 1989”, *Food Additives & Contaminants*, 7(3), 303-321.
- ARMENTA-AISPURO, P.G. (2019). “Estudio de las interacciones agua-goma (*Prosopis* spp)-harina en la congelación y descongelación: efecto en la viscoelasticidad del gluten”, Tesis de Maestría, Universidad de Sonora.
- ASPINALL, G., y Whitehead, C. (1970a). “Mesquite gum. I. The 4-O-methylglucuronogalactan core”, *Canadian Journal of Chemistry*, 48(24), 3840-3849.
- ASPINALL, G., y Whitehead, C. (1970b). “Mesquite gum. II. The arabinan peripheral chains”, *Canadian Journal of Chemistry*, 48(24), 3850-3855.
- BARAK, S., Mudgil, D., y Taneja, S. (2020). “Exudate gums: chemistry, properties and food applications—a review”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(7), 2828-2835.
- BERISTAIN, C. J., y Vernon-Carter, E. I. (1995). “Studies on the interaction of Arabic (*Acacia senegal*) and mesquite (*Prosopis juliflora*) gum as emulsion stabilizing agents for spray-dried encapsulated orange peel oil”, *Drying Technology*, 13(1-2), 455-461.
- CAUVAIN, S. P. (2007). “Dough retarding and freezing”, en S. P. Cauvain y L. S. Young (eds.), *Technology of Breadmaking*. Nueva York: Springer, 175-205.
- CONNOLLY, S., Fenyo, J., y Vandavelde, M. (1987). “The effect of pronase on the amino acid composition of gum arabic”, *Comptes Rendus des Seances de la Societe de Biologie et de ses Filiales*, 181, 683-687.
- DING, X., Zhang, H., Wang, L., Qian, H., Qi, X., & Xiao, J. (2015). Effect of barley antifreeze protein on thermal properties and water state of dough during freezing and freeze-thaw cycles. *Food Hydrocolloids*, 47, 32-40.
- DONG, Y., y Karboune, S. (2021). “A review of bread qualities and current strategies for bread bioprotection: flavor, sensory, rheological, and textural attributes”, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1937-1981.
- FENG, W., Ma, S., y Wang, X. (2020). “Quality deterioration and improvement of wheat gluten protein in frozen dough”, *Grain & Oil Science and Technology*, 3(1), 29-37.

- FERRERO, C. (2017). "Hydrocolloids in wheat breadmaking: a concise review", *Food Hydrocolloids*, 68, 15-22.
- FERRY, J. D. (1980). *Viscoelastic properties of polymers*. Canada: John Wiley & Sons.
- GASHUA, I., Williams, P., Yadav, M., y Baldwin, T. (2015). "Characterisation and molecular association of Nigerian and Sudanese Acacia gum exudates", *Food Hydrocolloids*, 51, 405-413.
- GHARAIE, Z., Azizi, M., Barzegar, M., y Hosseini Panjaki, M. (2013). "Rheological and sensory characteristics of barbari bread made from frozen dough containing salep and gum tragacanth", *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 8(3), 137-144.
- GHARAIE, Z., Azizi, M. H., Barzegar, M., y Aghagholizade, R. (2015). "Effects of hydrocolloids on the rheological characteristics of dough and the quality of bread made from frozen dough", *Journal of Texture Studies*, 46(5), 365-373.
- GLICKSMAN, M. (1983). "Gum tragacanth", en M. Glicksman (ed.), *Food Hydrocolloids*, 2. Boca Raton, Florida: CRC Press, 49-60.
- GOYCOOLEA, F. M., Morris, E., Richardson, R. K., y Bell, A. E. (1995). "Solution rheology of mesquite gum in comparison with gum arabic", *Carbohydrate Polymers*, 27(1), 37-45.
- HOWES, F. N. (1949). *Vegetable gums and resins*. Waltham, Massachusetts: Chronica Botanica Co.
- IDRIS, O., y Haddad, G. (2011). "Gum Arabic's (gum Acacia's) journey from tree to end user", en J. F. Kennedy, G. O. Phillips y P. A. Williams (eds.), *Gum Arabic*. Gran Bretaña: Royal Society of Chemistry, 3-17.
- KE, X., Guodong, Q., Xingke, L., Hongwei, W., Xingli, L., Yanyan, Z., y Hua, Z. (2021). "Effect of frozen storage time on water transformation and quality characteristics of dough", *Journal of Light Industry*, 36(1), 9-16.
- KENNEDY, J. F., Phillips, G. O., y Williams, P. A. (2012). "Commercial development", en J. F. Kennedy, G. O. Phillips y P. A. Williams (eds.), *Gum Arabic*. Gran Bretaña: Royal Society of Chemistry, 39-81.
- KETILATEH, M., Azizi, M., y Fazeli, F. (2013). "Effect of hydrocolloids (tragacanth & xanthan) on frozen dough characteristics and

- volumetric (hamburger) bread”, *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 7(5). 301-308.
- KNIGHT, C., Cheng, C., y DeVries, A. (1991). “Adsorption of alpha-helical antifreeze peptides on specific ice crystal surface planes”, *Biophysical Journal*, 59(2), 409-418.
- LI, J., Yadav, M. P., y Li, J. (2019). “Effect of different hydrocolloids on gluten proteins, starch and dough microstructure”, *Journal of Cereal Science*, 87, 85-90.
- LI, Y., Zhang, Y., Liu, X., Wang, H., y Zhang, H. (2019). “Effect of ultrasound-assisted freezing on the textural characteristics of dough and the structural characterization of wheat gluten”, *Journal of Food Science and Technology*, 56(7), 3380-3390.
- LIU, M., Liang, Y., Zhang, H., Wu, G., Wang, L., Qian, H., y Qi, X. (2018). “Production of a recombinant carrot antifreeze protein by *Pichia pastoris* GS115 and its cryoprotective effects on frozen dough properties and bread quality”, *LWT*, 96, 543-550.
- LIU, Q., Guo, X.-N., y Zhu, K.-X. (2019). “Effects of frozen storage on the quality characteristics of frozen cooked noodles”, *Food Chemistry*, 283, 522-529.
- LIU, Y., Zhang, X., Ding, B., Ding, W., Xiao, S., Song, J., Lyu, Q., Ke, Y., Wang, X., y Fu, Y. (2020). “Effect of hydrocolloids on physical, thermal and microstructure properties of par-baked baguette during frozen storage”, *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 1866-1874.
- LUO, W., Sun, D. W., Zhu, Z., y Wang, Q. J. (2018). “Improving freeze tolerance of yeast and dough properties for enhancing frozen dough quality. A review of effective methods”, *Trends in Food Science & Technology*, 72, 25-33.
- LÓPEZ-FRANCO, Y. L., Córdova-Moreno, R. E., Goycoolea, F. M., Valdez, M. A., Juárez-Onofre, J., y Lizardi-Mendoza, J. (2012). “Classification and physicochemical characterization of mesquite gum (*Prosopis spp.*)”, *Food Hydrocolloids*, 26(1), 159-166.
- LÓPEZ-FRANCO, Y. L., de la Barca, A. M. C., Valdez, M. A., Peter, M. G., Rinaudo, M., Chambat, G., y Goycoolea, F. M. (2008). “Structural characterization of mesquite (*Prosopis velutina*) gum and its fractions”, *Macromolecular Bioscience*, 8(8), 749-757.

- LÓPEZ-FRANCO, Y. L., Higuera-Ciapara, I., Lizardi-Mendoza, J., Wang, W., y Goycoolea, F. M. (2021). "Other exudates: tragacanth, karaya, mesquite gum and larchwood arabinogalactan", en P. A. Williams y G. O. Phillips (eds.), *Handbook of Hydrocolloids*. Cambridge, Reino Unido: Woodhead International Ltd., 495-534.
- LÓPEZ-FRANCO, Y. L., Valdez, M. A., Hernández, J., Calderón de la Barca, A. M., Rinaudo, M., y Goycoolea, F. M. (2004). "Macromolecular dimensions and mechanical properties of monolayer films of Sonorean mesquite gum", *Macromolecular Bioscience*, 4(9), 865-874.
- MA, S., Li, L., Wang, X.-X., Zheng, X.-l., Bian, K., y Bao, Q.-D. (2016). "Effect of mechanically damaged starch from wheat flour on the quality of frozen dough and steamed bread", *Food Chemistry*, 202, 120-124.
- MAITY, T., Saxena, A., y Raju, P. (2018). "Use of hydrocolloids as cryoprotectant for frozen foods", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(3), 420-435.
- NEJATIAN, M., Abbasi, S., y Azarikia, F. (2020). "Gum tragacanth: structure, characteristics and applications in foods", *International Journal of Biological Macromolecules*, 160, 846-860.
- OMEDI, J. O., Huang, W., Zhang, B., Li, Z., y Zheng, J. (2019). "Advances in present-day frozen dough technology and its improver and novel biotech ingredients development trends. A review", *Cereal Chemistry*, 96(1), 34-56.
- QI, W., Fong, C., y Lamport, D. T. (1991). "Gum arabic glycoprotein is a twisted hairy rope: a new model based on O-galactosylhydroxyproline as the polysaccharide attachment site", *Plant Physiology*, 96(3), 848-855.
- RIBOTTA, P. D., León, A. E., y Añón, M. C. (2003). "Effects of yeast freezing in frozen dough", *Cereal Chemistry*, 80(4), 454-458.
- RINAUDO, M., Goycoolea, F., y Valdez, M. (2008). "Emulsifying properties of mesquite gum", *Foods & Food Ingredients Journal of Japan*, 239-248.
- SALEHI, F. (2020). "Effect of common and new gums on the quality, physical, and textural properties of bakery products: a review", *Journal of Texture Studies*, 51(2), 361-370.

- SHAO, L.-F., Guo, X.-N., Li, M., y Zhu, K.-X. (2019). "Effect of different mixing and kneading process on the quality characteristics of frozen cooked noodle", *LWT - Food Science and Technology*, 101, 583-589.
- SHARADANANT, R., y Khan, K. (2006). "Effect of hydrophilic gums on the quality of frozen dough: electron microscopy, protein solubility, and electrophoresis studies", *Cereal Chemistry*, 83(4), 411-417.
- SHARADANANT, R., y Khan, K. (2003a). "Effect of hydrophilic gums on frozen dough. I. Dough quality", *Cereal Chemistry*, 80(6), 764-772.
- SHARADANANT, R., y Khan, K. (2003b). "Effect of hydrophilic gums on the quality of frozen dough: II. Bread characteristics", *Cereal Chemistry*, 80(6), 773-780.
- SHEIKHOESLAMI, Z., Hejrani, T., Karimi, M., Ghiafeh Davoodi, M., y Fatemian, H. (2017). "Effect of *L. Sativum* seed gum, tragacanth and concentrations on properties of partly baked frozen barbari bread", *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 5(4), 395-404.
- SHI, K., Yu, H., Jin, J., y Lee, T.-C. (2013a). "Improvement to baking quality of frozen bread dough by novel zein-based ice nucleation films", *Journal of Cereal Science*, 57(3), 430-436.
- SHI, K., Yu, H., y Lee, T.-C. (2013b). "A novel approach for improving yeast viability and baking quality of frozen dough by adding biogenic ice nucleators from *Erwinia herbicola*", *Journal of Cereal Science*, 57(2), 237-243.
- SLUIMER, P. (2005). "Frozen dough", en P. Sluimer (ed.), *Principles of breadmaking: functionality of raw materials and process steps*. EE. UU.: American Association of Cereal Chemists, 95-100.
- TAO, H., Wang, P., Wu, F., Jin, Z., y Xu, X. (2016). "Particle size distribution of wheat starch granules in relation to baking properties of frozen dough", *Carbohydrate Polymers*, 137, 147-153.
- TAVAKOLI, H. R., Jonaidi Jafari, N., y Hamed, H. (2017). "The effect of Arabic gum on frozen dough properties and the sensory assessments of the bread produced", *Journal of Texture Studies*, 48(2), 124-130.

- USTUN, N. S., y Turhan, S. (2015). "Antifreeze proteins: characteristics, function, mechanism of action, sources and application to foods", *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 3189-3197.
- VERBEKEN, D., Dierckx, S., y Dewettinck, K. (2003). "Exudate gums: occurrence, production, and applications", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63(1), 10-21.
- VILLAGÓMEZ-ZAVALA, D., Gómez-Corona, C., San Martín Martínez, E., Pérez-Orozco, J., Vernon-Carter, E., y Pedroza-Islas, R. (2008). "Comparative study of the mechanical properties of edible films made from single and blended hydrophilic biopolymer matrices", *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7(3), 263-273.
- WANG, B., Li, Y., Wang, H., Liu, X., Zhang, Y., y Zhang, H. (2020). "In-situ analysis of the water distribution and protein structure of dough during ultrasonic-assisted freezing based on miniature Raman spectroscopy", *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105-149.
- WANG, H., Xu, K., Liu, X., Zhang, Y., Xie, X., y Zhang, H. (2021). "Understanding the structural, pasting and digestion properties of starch isolated from frozen wheat dough", *Food Hydrocolloids*, 111, 106-168.
- WANG, P., Chen, H., Mohanad, B., Xu, L., Ning, Y., Xu, J., Wu, F., Yang, N., Jin, Z., y Xu, X. (2014). "Effect of frozen storage on physicochemistry of wheat gluten proteins: studies on gluten, glutenin- and gliadin-rich fractions", *Food Hydrocolloids*, 39, 187-194.
- WANG, P., Jin, Z., y Xu, X. (2015). "Physicochemical alterations of wheat gluten proteins upon dough formation and frozen storage. A review from gluten, glutenin and gliadin perspectives", *Trends in Food Science & Technology*, 46(2), 189-198.
- WANG, W. (2000). "Tragacanth and karaya", en G. O. Phillips y P. A. Williams (eds.), *Handbook of Hydrocolloids*. Nueva York: Woodhead Publishing Ltd., 231-246.
- WHISTLER, R. L. (1993). "Exudate gums", en R. L. Whistler y J. N. Bemiller (eds.), *Industrial Gums*. Academic Press, 309-339.
- WIESER, H. (2007). "Chemistry of gluten proteins", *Food microbiology*, 24(2), 115-119.

- WILLIAMS, P. A., y Phillips, G. O. (2021). "Gum arabic", en P. A. Williams y G. O. Phillips (eds.), *Handbook of Hydrocolloids*. Cambridge, Reino Unido: Woodhead International Ltd., 627-652.
- YANG, Z., Yu, W., Xu, D., Guo, L., Wu, F., y Xu, X. (2019). "Impact of frozen storage on whole wheat starch and its A-Type and B-Type granules isolated from frozen dough", *Carbohydrate Polymers*, 223, 115-142.
- ZHANG, Y., Li, Y., Wang, H., Oladejo, A. O., Zhang, H., y Liu, X. (2020). "Effects of ultrasound-assisted freezing on the water migration of dough and the structural characteristics of gluten components", *Journal of Cereal Science*, 94, 102-893.
- ZHANG, Y., Zhang, H., Wang, L., Qian, H., y Qi, X. (2015). "Extraction of oat (*Avena sativa* L.) antifreeze proteins and evaluation of their effects on frozen dough and steamed bread", *Food and Bioprocess Technology*, 8(10), 2066-2075.
- ZHU, F. (2021). "Frozen steamed breads and boiled noodles: quality affected by ingredients and processing", *Food Chemistry*, 349, 129-178.

CAPÍTULO 16

COMPOSICIÓN, PROPIEDADES Y USOS DEL MEZQUITE EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

REY DAVID VARGAS-SÁNCHEZ¹
BRISA DEL MAR TORRES-MARTÍNEZ¹,
GASTÓN RAMÓN TORRESCANO-URRUTIA¹,
MARÍA DE LOS ÁNGELES DE LA ROSA-ALCARAZ²,
ARMIDA SÁNCHEZ-ESCALANTE¹

RESUMEN

El mezquite es una planta distribuida en regiones áridas y semiáridas que pertenece al género *Prosopis* (familia Fabaceae), nativa del continente asiático, africano y americano. Esta planta se caracteriza por su alta capacidad para fijar nitrógeno en áreas muy secas, y por ser una fuente importante de alimento para humanos y animales. Además, se ha reportado que cada una de las partes morfológicas que lo conforman (raíz, hojas, flores, vaina, semilla, entre otras), poseen compuestos bioactivos con propiedades de interés para la industria farmacéutica y alimentaria. Por ello, en diversas investigaciones se ha propuesto la recuperación de estos compuestos, para su posterior uso como aditivo alimentario. Los resultados de las diferentes investigaciones indican que la vaina de mezquite es una fuente importante de aminoácidos, ácidos grasos, minerales, azúcares, fibra dietaria, y otros componentes como tocoferoles

¹ Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Animal (CTAOA), Laboratorio de Investigación en Carne y Productos Cárnicos (LICPC). Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD, A.C.). Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas #46, C.P. 83304, Hermosillo, Sonora, México.

² Universidad Estatal de Sonora (UES). Boulevard Manlio Fabio Beltrones 810, Col. Bugambilias, C.P. 85875 Navojoa, Sonora, México.

y compuestos fenólicos, los cuales se han asociado a sus propiedades funcionales. Además, se demostró que sus hojas y vainas pueden ser utilizadas como aditivos en bebidas, productos de panadería y productos cárnicos. En este capítulo se describen diversos trabajos que abordan la composición nutricional, propiedades funcionales y el potencial uso del mezquite como aditivo en los alimentos.

PALABRAS CLAVE: aditivo alimentario, compuestos bioactivos, propiedades biológicas, *Prosopis* spp., tecno-funcional.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las plantas han sido consideradas fuentes valiosas para la recuperación de compuestos con un amplio espectro de propiedades bioactivas de interés para la industria farmacéutica; sin embargo, también han sido objeto de estudio para la obtención de nuevos aditivos que son de interés para la industria alimentaria. Por lo que, las plantas de zonas áridas pueden ser consideradas un potencial recurso natural, con posibilidades de ser aprovechadas de manera racional y sostenible, debido a que muchas de estas se aprovechan como recurso medicinal y alimenticio (González-Montemayor *et al.*, 2019; Munekata *et al.*, 2020).

El mezquite es una planta leguminosa que incluye 44 especies y crece de forma silvestre en regiones áridas y semiáridas de Asia, África y Norte América (González-Montemayor *et al.*, 2019; Palacios, 2006). Perteneció al reino: Plantae, división Magnoliophyta, clase Magnoliopsida (Dicotiledonas), subclase Rosidae, orden Fabales, familia Fabaceae y género *Prosopis*.

En México esta planta se distribuye a lo largo de la costa del Pacífico, en la zona del Golfo de México, y en toda la región central del país; zonas en las que pudieran encontrarse diferentes especies, incluyendo *P. odorata*, *P. glandulosa*, *P. velutina*, *P. articulata*, *P. tamaulipana*, *P. yaquiensis*, *P. virdaliana*, *P. laevigata*, *P. mezcalana*, *P. mayana* y *P. juliflora* (Palacios, 2006).

El mezquite es una especie vegetal importante debido a su alto potencial para fijar nitrógeno en áreas muy secas, por la composición de nutrientes presentes en sus hojas, así como en su fruto, que incluye la vaina y su semilla; estas últimas se consideran un alimento para humanos y muchas especies animales (Díaz-Batalla *et al.*, 2018a; Palacios, 2006; Pérez *et al.*, 2020). Además, el mezquite se ha utilizado como medicamento complementario para tratar diversas afecciones patológicas como lepra, disentería, asma, entre otras (González-Montemayor *et al.*, 2019). También, en diversos trabajos de investigación se ha demostrado que el mezquite posee propiedades bioactivas de interés para la industria farmacéutica como actividad antitumoral y antiinflamatoria (Gonzales-Barron *et al.*, 2020b; González-Montemayor *et al.*, 2019), así como propiedades bioactivas y tecnofuncionales que son de interés para la industria alimentaria (García-Alonzo, 2020; Gonzales-Barron *et al.*, 2020b). Por ello,

el mezquite puede ser considerado como un material prometedor para futuras aplicaciones en la industria alimentaria como aditivo.

Basado en lo anterior, el presente capítulo resume trabajos de investigación que abordan la composición nutricional, compuestos y propiedades bioactivas, así como diversos ejemplos que resaltan el uso del mezquite como aditivo para la industria de los alimentos.

COMPOSICIÓN NUTRICIONAL

En diversos trabajos de investigación, se ha reportado que la composición nutrimental del mezquite (cuadro 1), dependerá de la región anatómica de interés en la planta (vainas, semillas, otras). Por ejemplo, la vaina está compuesta principalmente de carbohidratos, fibra dietaria, proteínas y agua, mientras que los minerales y lípidos son considerados los componentes minoritarios; aunque esta composición también dependerá de la especie (Gonzales-Barrón *et al.* 2020a y b; Velásquez-Jiménez, 2018). Además, las semillas son consideradas una fuente importante de proteínas y lípidos, así como fibra dietaria (Díaz-Batalla *et al.*, 2018a y b). Mientras que, las proteínas son el componente mayoritario en el mesocarpio de la vaina y en el mesocarpio de la semilla de la vaina de mezquite (Díaz-Batalla *et al.* 2018b).

CUADRO 1
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE HARINAS DE MEZQUITE
DE DIFERENTES ESPECIES Y PARTES ANATÓMICAS

Material evaluado	Composición nutricional	Referencias
Harina de semilla (<i>P. africana</i>)	Proximal (%) : CH (14.8), CC (4.0), CP (35.1), CL (4.0), FD (7.8) y CHOS (≠). Minerales (%) : Ca (2.1) y P (2.3). Aminoácidos (g/kg proteína) : Arg, His, Ile, Leu, Lys, Met, Phe, Thr, Try, Val, Tyr, Pro, Cys, Ala, Glut, Ser, y Asp.	Aroyehun <i>et al.</i> (2021)

CUADRO 1
 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE HARINAS DE MEZQUITE
 DE DIFERENTES ESPECIES Y PARTES ANATÓMICAS (continuación)

Material evaluado	Composición nutricional	Referencias
Harinas de vaina (<i>P. nigra</i>)	Proximal (g/100 g): CH (34.0), CC (4.3), CP (11.8), CL (1.0), FD (14.4) y CHOS (68.5). Azúcares (g/100 g): Sac (46.1), Glu (1.9) y Fruc (36.9). Minerales (µg/g): Mg (480), K (10,062), Na (11), Ca (1,990) y Fe (30).	Pérez <i>et al.</i> (2020)
Harina de mesocarpio de la vaina (<i>P. pallida</i>)	Proximal (g/100 g): CH (≠), CC (2.3), CP (9.5), CL (1.0), FD (29.6) y CHOS (57.6). Azúcares (g/100 g): Sac (17.5), Glu (0.13) y Fruc (0.59). Tocoferoles (g/100 g): α-tocoferol (0.55), δ-tocoferol (0.16) y γ-tocoferol (1.81). Ácidos grasos (%): C6:0 (0.01), C8:0 (0.025), C11:0 (0.04), C12:0 (0.02), C14:0 (0.07), C15:0 (0.05), C16:0 (12.6), C16:1 (0.18), C17:0 (0.16), C18:0 (2.58), C18:1n9c (35.5), C18:1n6c (45.8), C18:1n3c (1.67), C20:0 (0.7), C20:1 (0.31), C20:2 (0.17); SFA, MUFA y PUFA (16.3, 36.0 y 47.7, respectivamente)	Gonzales-Barron <i>et al.</i> (2020b)
Harina de mesocarpio de la vaina (<i>P. pallida</i>)	Proximal (g/100 kg): CH (≠), CC (2.3), CP (9.5), CL (1.0), FD (29.6) y CHOS (57.6)	Gonzales-Barron <i>et al.</i> (2020a)
Harina de vaina (<i>P. alba</i> y <i>P. chilensis</i>)	Proximal (%): <i>P. alba:</i> CH (3.7), CC (3.6), CP (8.8), CL (1.8), FD (≠) y CHOS (82.2). <i>P. chilensis:</i> CH (3.9), CC (3.6), CP (9.5), CL (1.8), FD (≠) y CHOS (81.8).	García-Alonzo (2020)
Harina de hoja y semilla (<i>P. juliflora</i>)	Proximal (%): <i>Hoja:</i> CH (3.4), CC (2.1), CP (20.4), CL (≠), FD (≠) y CHOS (≠). <i>Semilla:</i> CH (8.7), CC (8.0), CP (27.7), CL (≠), FD (≠) y CHOS (≠).	Franco-Sarmiento & Ruz-Echavarría (2020)

Composición, propiedades y usos del mezquite en la industria alimentaria

CUADRO 1
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE HARINAS DE MEZQUITE
DE DIFERENTES ESPECIES Y PARTES ANATÓMICAS (continuación)

Material evaluado	Composición nutricional	Referencias
Harina de vaina (<i>P. alba</i>)	Proximal (g/100 kg): CH (8.6), CC (3.5), CP (7.5), CL (2.9), FD (20.3) y CHOS (57.2). Minerales (mg/100 g): K (969.7), Mg (54.0), Zn (1.8), Ca (445.0), P (617) y Fe (5.0).	Fabiani <i>et al.</i> (2020)
Harina de vaina (<i>P. alba</i> y <i>P. chilensis</i>)	Proximal (%): <i>P. alba</i> : CH (3.1), CC (3.3), CP (9.5), CL (4.4), FD (≠) y CHOS (79.7). <i>P. chilensis</i> : CH (3.2), CC (3.4), CP (9.9), CL (3.1), FD (≠) y CHOS (80.5).	Velásquez-Jiménez (2018)
Harina de vaina (<i>P. alba</i>)	Proximal (g/kg): CH (103.4), CC (26.7), CP (77.5), CL (13.3), FD (219.0) y CHOS (≠). Azúcares (g/kg): Sac (447.7), Fruc (32.2) y Glu (10.3).	Bigne <i>et al.</i> (2018)
Harinas de mesocarpio, mesocarpio de semilla y semilla de vaina (<i>P. laevigata</i>)	Proximal (g/kg): <i>Mesocarpio</i> : CH (83.3), CC (50.8), CP (105.8), CL (25.0), FD (22) y CHOS (≠). <i>Semilla</i> : CH (65.0), CC (42.0), CP (309.5), CL (40.3), FD (83.5) y CHOS (≠). <i>Mesocarpio de semilla</i> : CH (77.1), CC (40.7), CP (119.3), CL (18.1), FD (42.0) y CHOS (≠). Aminoácidos (g/kg proteína): <i>Mesocarpio</i> : His (25.7), Ile (28.2), Leu (75.5), Lys (54.0), Met + Cys (26.2), Phe + Tyr (61.2), Thr (34.6), Trp (8.7) y Val (40.7). <i>Semilla</i> : His (24.7), Ile (28.5), Leu (68.9), Lys (55.1), Met + Cys (34.8), Phe + Tyr (58.4), Thr (30.2), Trp (6.5) y Val (34.1). <i>Mesocarpio de semilla</i> : His (29.5), Ile (26.6), Leu (70.2), Lys (52.5), Met + Cys (29.7), Phe + Tyr (60.8), Thr (30.6), Trp (6.4) y Val (36.3).	Díaz-Batalla <i>et al.</i> (2018b)

CUADRO 1
 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE HARINAS DE MEZQUITE
 DE DIFERENTES ESPECIES Y PARTES ANATÓMICAS (continuación)

Material evaluado	Composición nutricional	Referencias
Harinas de mesocarpio, mesocarpio de semilla y semilla de vaina (<i>P. laevigata</i>)	Azúcares (g/kg): <i>Mesocarpio</i> : Sac (308.6), Glu (77.6), Fruc (47.9), Xyl (13.5). <i>Semilla</i> : Sac (69.7), Glu (13.4), Fruc (10.8), Xyl (1.9). <i>Mesocarpio de semilla</i> : Sac (256.1), Glu (26.8), Fruc (14.3), Xyl (7.6).	Díaz-Batalla <i>et al.</i> (2018b)
Harina de semilla (<i>P. laevigata</i>)	Proximal (g/kg): CH (8.28), CC (4.14), CP (36.51), CL (4.83), FD (7.73) y CHOS (38.45). Aminoácidos (mg/g proteína): Asp (83.4), Thr (29.8), Ser (48.1), Glu (177.2), Pro (62.6), Gly (50.6), Ala (43.1), Val (34.8), Ile (29.2), Leu (69.1), Tyr (22.8), Phe (35.6), His (24.2), Lys (54.8), Arg (112.2), Cys (25.9), Met (9.1), Trp (6.5), Met + Cys (34.9) y Phe + Tyr (58.4).	Díaz-Batalla <i>et al.</i> (2018a)
Harina de vaina (<i>P. juliflora</i>)	Proximal (g/100 g): CH (7.2), CC (2.5), CP (9.1), CL (1.2), FD (15.1) y CHOS (70.5). Minerales (mg/100 g): Ca (650.75), P (879.12) y Fe (10.2).	de Gusmão <i>et al.</i> (2016)
Harina de vaina (<i>P. alba</i>)	Proximal (g/100 g): CH (≠), CC (6.5), CP (10.0), CL (3.5), FD (23.3) y CHOS (56.8).	Bigne <i>et al.</i> (2016)
Harina de vaina (<i>P. velutina</i>)	Proximal (g/100 g): CH (4.4), CC (3.1), CP (11.2), CL (0.4), FD (≠) y CHOS (81.3).	Aispuro-Sainz (2014)
Harina de vaina (<i>P. chilensis</i>)	Proximal (g/100 g): CH (≠), CC (2.4), CP (7.8), CL (1.7), FD (10.8) y CHOS (53.7).	Estévez <i>et al.</i> (2013)
Harina de vaina (<i>P. chilensis</i>)	Proximal (g/100 g): CH (6.5), CC (3.2), CP (9.3), CL (1.1), FD (10.8) y CHOS (69.1). Aminoácidos (g/100 g): Ile (3.3), Leu (7.9), Lys (4.3), Met + Cys (1.0), Phe + Tyr (5.8), Thr (4.7), Trp (0.9), Val (7.8) y His (2.9).	Cerezal-Mezquita <i>et al.</i> (2012)

CUADRO 1
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE HARINAS DE MEZQUITE
DE DIFERENTES ESPECIES Y PARTES ANATÓMICAS (continuación)

Material evaluado	Composición nutricional	Referencias
Harina de vaina (<i>P. laevigata</i>)	Proximal (%) : CH (9.0), CC (5.5), CP (14.7), CL (3.2), FD (21.3) y CHOS (46.3). Aminoácidos (mg/g proteína) : His (45.0), Thr (45.0), Lys (20.0), Trp (53.0), Val (62.0), Met + Cys (14.0), Ile (26.0), Leu (56.0) y Phe + Tyr (28.0).	De la Rosa <i>et al.</i> (2006)
Hojuelas de vaina (<i>P. juliflora</i>)	Proximal (%) : <i>Vaina</i> : CH (9.0), CC (5.5), CP (14.7), CL (3.2), FD (21.3) y CHOS (46.3). <i>Pericarpio</i> : CH (10.1), CC (6.4), CP (10.5), CL (6.4), FD (20.4) y CHOS (49.9). <i>Cáscara</i> : CH (5.4), CC (4.2), CP (11.3), CL (1.8), FD (31.6) y CHOS (45.7). <i>Semilla</i> : CH (8.3), CC (7.6), CP (37.2), CL (6.3), FD (8.5) y CHOS (32.1).	Del Valle <i>et al.</i> (1983)

(*) valor no mostrado. CH, contenido de humedad; CC, contenido de cenizas; CP, contenido de proteínas; CL, contenido de lípidos; FD, fibra dietaria; CHOS, contenido de carbohidratos.

En relación con el contenido de proteínas, en vainas de mezquite se ha reportado la presencia de aminoácidos esenciales (Ile, isoleucina; Leu, leucina; Lys, lisina; Met, metionina; Phe, fenilalanina; Thr, treonina; Trp, triptófano; Val, valina; His, histidina), así como no esenciales tales como cisteína (Cys) y tirosina (Tyr) (Cerezal-Mezquita *et al.*, 2012; De la Rosa *et al.*, 2006). Mientras que en semilla y mesocarpio de semilla de vaina de mezquite se reportó la presencia de los aminoácidos His, Ile, Leu, Lys, Met + Cys, Phe + Tyr, Thr, Trp y Val (Díaz-Batalla *et al.*, 2018b). Respecto al contenido de lípidos, en la vaina de mezquite se han identificado ácidos grasos saturados, siendo el ácido palmítico (C16:0) el encontrado a mayor concentración; mientras que los ácidos insaturados linoleico (C18:1n6c) y oleico (C18:1n9c) son los encontrados en mayor concentración (Gonzales-Barron *et al.*, 2020b)

Adicionalmente, tanto en la vaina como en la semilla de mezquite se han identificado diferentes tipos de azúcares (Sac, sacarosa; Glu, glucosa; Fruc, fructosa; Xyl, xilosa), y minerales tales como potasio (K), magnesio

(Mg), zinc (Zn), calcio (Ca), fósforo (P), hierro (Fe), por mencionar algunos (Díaz-Batalla *et al.*, 2018b; Fabiani *et al.*, 2020; Gonzales-Barron *et al.*, 2020b).

COMPUESTOS BIOACTIVOS DEL MEZQUITE

Las plantas son consideradas una importante fuente de compuestos bioactivos conocidos como fitoquímicos, incluyendo alcaloides, taninos, terpenos, saponinas, esteroides y compuestos fenólicos; sin embargo, la presencia de estos compuestos dependerá de la región anatómicas de interés (González-Montemayor *et al.*, 2019; Munekata *et al.*, 2020; Samejo *et al.*, 2013).

En relación con la presencia de compuestos fenólicos, en una investigación realizada por García-Andrade *et al.* (2013) se reportó que los extractos acetónicos crudos y fraccionados (agua, metanol y agua-metanol 1:1) obtenidos de hoja de *P. laevis* son una importante fuente de compuestos fenólicos. En los extractos acetónicos se identificó la presencia de ácidos fenólicos (gálico y *p*-cumárico) y flavonoides (galocatequina, galato de epicatequina, rutina, morina y naringenin), composición que mostró variación en la fracción purificada acuosa (ácido *p*-cumárico, galocatequina, galato de epicatequina, rutina y morina), metanólica (ácido gálico, catequina, galato de epicatequina y rutina), acuosa-metanólica (galato de epicatequina, rutina y luteolina).

En otra investigación, Díaz-Batalla *et al.* (2018a) identificaron al flavonoide apigenina en harinas de vaina de *P. laevis*. Además, Fabiani *et al.* (2020) demostraron la presencia en harina de vaina de *P. alba* de los ácidos gálico, cafeico, *p*-cumárico, sinápico, ferúlico y cinámico, así como al flavonoide catequina. También, Gonzalez-Barron *et al.* (2020b) reportaron la presencia de isómeros del flavonoide apigenina (apigenina-C-hexósido-C-pentósido) en harina de mesocarpio de vaina de *P. pallida*. Mientras que en el estudio realizado por Pérez *et al.* (2020) se identificó en harina de vaina de *P. nigra* la presencia de los ácidos cumárico y ferúlico, así como isómeros de los flavonoides apigenina, quercetina y kaempferol.

Adicionalmente, Sharifi-Rad *et al.* (2021) mediante técnicas cromatográficas (LC-ESI-QTOF-MS/MS) identificaron la presencia de ácidos

fenólicos en el extracto etanólico-acuso (85%) de hojas de *P. farcta*, incluyendo a los del grupo de los ácidos hidroxibenzoicos (ácidos 2-hidroxibenzoico, 2,3-dihidroxibenzoico, y 4-O-glucosido 4-hidroxibenzoico), ácidos hidroxicinámicos (cafeico, cumárico, sinapico, 3-O-glucurónido del ácido cafeico, -O-glucurónido del ácido ferúlico y 1,5-dicafeoilquínico), hidroxifenilacético (ácido 3,4-dihidroxifenilacético), ácidos hidroxifenilpropanoicos (dihidroferúlico 4-O-glucurónido y dihidrocafeico 4-O-glucurónido), e hidroxifenilpentanoico como el 5-(3'-metoxi-4'-hidroxifenil) - γ -valerolactona. Adicionalmente, se identificaron flavonoides del grupo de los flavanoles (4'-O-metilepigalocatequina, dímero de procianidina B1, miricetina 3-O-galactósido, miricetina 3-O-ramnosido, trímero de procianidina C1, (+)-catequina, (+)-catequina 3-O-galato). Mientras que, los flavonoides identificados del grupo de las flavonas fueron la apigenina 6,8-di-C-glucósido, 6-hidroxluteolina 7-O-ramnosido, rhoifolina, apigenina 6-C-glucósido, diosmina y cri-soeriol 7-O-glucósido. Además, del grupo de las flavanonas se identificaron neoeriocitrin y hesperetina 3'-O-glucurónido. Los compuestos quercetina 3-O-(6 "-malonil-glucósido), miricetina 3-O-rutinósido, kaempferol 3-O-(2'' - ramnosil-galactósido), 7-O-ramnosido y kaempferol 3,7-O-diglucósido, fueron los flavonoides del grupo de los flavonoles identificados. En el grupo de las dihidrochalconas, se identificó a los compuestos 3-hidroxifloretina 2'-O-glucósido y floridzina. En el grupo de los dihidroflavonoles se identificó a la dihidromiricetina 3-O-ramnósida y dihidroquercetina 3-O-ramnósida, y de los isoflavonoides se identificaron a la 6' -O-acetilglicitina, 5,6,7,3', 4'-entahidroxiisoflavona, 6''-O-malonilgenistina, 3'-hidroxigenisteína y glicitina.

PROPIEDADES FARMACOLÓGICAS DEL MEZQUITE

El mezquite ha sido considerado una planta de gran interés en el campo de la medicina debido a su importancia etnobotánica y propiedades farmacológicas, las cuales están asociadas a los compuestos bioactivos que este posee (Thakur *et al.*, 2014). A continuación, se describen algunas de las propiedades farmacológicas que presentan las harinas y/o extractos obtenidos a partir de diferentes partes anatómicas de esta planta.

Actividad cardioprotectora

En el trabajo de investigación realizado por García-Andrade *et al.* (2013), se mostró el efecto antihipertensivo de extractos obtenidos de hoja de *P. laevigata*, los cuales fueron capaces de inhibir la enzima convertidora de angiotensina. Además, en este mismo estudio se demostró el efecto cardioprotector de estos extractos al presentar un efecto inhibitor sobre la oxidación de lipoproteínas de baja densidad (LDL). En otro estudio, Huisamen *et al.* (2013) reportaron que la suplementación con harina de vaina de *P. glandulosa* en ratas hipertensas previno y corrigió el desarrollo de la hipertensión, que también se reflejó al evitar la retención de líquidos, posiblemente asociada a la vasoconstricción en estos animales.

Actividad antidiabetogénica

En la investigación realizada por Feyzmand *et al.* (2017), se reportó que los extractos obtenidos con diferentes solventes (etanol, hexano, acetona, agua-etanol) a partir de la raíz de *P. farcta* poseen propiedades antidiabetogénicas potenciales, debido a que estos extractos atenuaron la muerte por apoptosis inducida por estreptozotocina en células β -TC3 y aumentaron el consumo de glucosa. Mientras que Soni *et al.* (2018) reportaron que el extracto obtenido con cloroformo a partir de corteza de tallo de *P. cineraria*, presentó *in vitro* e *in vivo* actividad antidiabetogénica. Además, estos investigadores indicaron que el modo de acción es múltiple y está asociado con la acción antihiper glucemiante, hipoglucemiante posprandial, hipolipidémica y secretoras. En otro estudio, Mehrizi *et al.* (2020) evaluaron el efecto del extracto hidroalcohólico y acuoso de la vaina de *P. farcta* sobre el nivel de captación de glucosa en los adipocitos 3T3-L1. Los resultados de este estudio mostraron que tanto el extracto acuoso como el hidroalcohólico de *P. farcta* de una manera dependiente de la dosis fueron eficaces para aumentar el nivel de captación de glucosa en los adipocitos 3T3-L1. Sin embargo, los estudios futuros deben encontrar posibles vías moleculares asociadas con la acción de *P. farcta*.

Actividad antiinflamatoria

En su investigación, Yadav *et al.* (2018) evaluaron las fracciones de acetato de etilo, cloroformo y butanol del extracto hidroetanólico de *P. cineraria* respecto a su composición química, actividad antioxidante, efecto inhibidor antiinflamatorio y enzimático (colagenasa y elastasa) para confirmar el mecanismo de acción subyacente del proceso de cicatrización de heridas. El extracto butanólico presentó la más alta actividad antiradical, asociada a la presencia de los ácidos protocatecuico, clorogénico, ferúlico y cafeico. Por lo que, este extracto fue seleccionado, demostrándose sus propiedades antiinflamatorias, anti-colagenasa y anti-elastasa. También, la aplicación del extracto butanólico como ungüento durante 16 días consecutivos en el área de lesiones dorsales de ratas, confirmó el proceso de cicatrización de las heridas, un mayor contenido de hidroxiprolina, reducción del período de epitelización y marcadores inflamatorios en sangre, en comparación con el grupo de control. El análisis histológico también refrendó los resultados al promover la formación de colágeno, la reepitelización, la angiogénesis y principalmente la restauración de los apéndices cutáneos, i. p. ej., folículos pilosos. Además, los resultados del estudio mostraron que el extracto butanólico tiene potencial para actuar como un eficaz agente cicatrizante de heridas cutáneas.

Por otro lado, en otro trabajo realizado por Sharma & Sharma (2020), se investigó el perfil de fitoquímicos y actividad antioxidante, así como el potencial antiinflamatorio del extracto hidro-etanólico (80%) de la corteza de *P. cineraria* contra la inflamación inducida por lipopolisacáridos (LPS) en ratones macho albinos suizos. Los resultados demostraron la presencia de fitoquímicos como los flavonoides, saponinas, taninos, proantocinidinas y fenoles en el extracto. El extracto de *P. cineraria* mostró potencial antioxidante *in vitro* contra los radicales DPPH[•], radical hidroxilo (HO[•]), anión superóxido (O₂⁻), y radical óxido nítrico (HO[•]). Además, los resultados demostraron que la suplementación del extracto en ratones macho intoxicados con LPS, modificó los niveles de citosinas (TNF- α , NF- κ B, NO, IL-6, IFN- γ , prostaglandina E2 e IL-10), lo que mostró el efecto antiinflamatorio de *P. cineraria*.

Actividad antifúngica

En relación con la actividad antifúngica, en la investigación realizada por Solanki *et al.* (2018), se demostró el efecto antifúngico de aislados proteicos de la semilla de *P. cineraria* contra patógenos fúngicos (*Lasioidiploida theobromae* y *Aspergillus fumigatus*) aislados de fruta podrida, recomendando estos extractos para ser utilizados en el manejo de enfermedades de plantas postcosecha, como alternativa para reducir químicos peligrosos. Mientras que, Jameel *et al.* (2019), evaluaron la actividad antifúngica de extractos obtenidos con diferentes solventes (agua, metanol, acetato de etilo y hexano) a partir de harina de hojas + tallos de *P. cineraria*. Los resultados de esta investigación mostraron que el extracto obtenido con acetato de etilo presentó el mayor efecto antifúngico contra *Candida albicans*. Sin embargo, los extractos evaluados no presentaron efecto contra *Aspergillus niger*. Estos autores indicaron que es necesario realizar un perfil de fitoquímicos a estos extractos, para identificar los componentes biológicamente activos que pueden conducir al desarrollo de nuevos fármacos antimicóticos.

Por su parte, López-Achondo *et al.* (2021), demostraron el efecto antifúngico de extractos obtenidos con agua a partir de hojas, flores y ramas de *P. glandulosa*, contra hongos fitopatógenos (*Colletotrichum gloeosporoides*, *Fusarium oxysporum*, *Rhizopus oryzae* y *Rhizopus stolonifer*). Los resultados de este trabajo muestran que el mayor efecto *in vitro* fue presentado contra *C. gloeosporoides* y *F. oxysporum*, en dependencia de la concentración utilizada. Mientras que la adición de estos extractos en la superficie de fresas, zanahorias y tomates durante su almacenamiento (264 h, 4°C) fue efectiva contra *C. gloeosporoides* y *F. oxysporum*.

En una investigación reciente (Elaigwu *et al.*, 2021), se investigó el perfil de fitoquímicos y la actividad antifúngica de extractos obtenidos con diferentes solventes (éter de petróleo, acetato de etilo, metanol y agua) a partir de hojas de *P. africana* contra *Macrophomina phaseolina*, el agente causal de la pudrición de la raíz de *Sesamum indicum* L. Los resultados del análisis fitoquímicos mostraron la presencia de alcaloides, saponinas, taninos, flavonoides y antraquinonas en los extractos. Los resultados también mostraron reducción del crecimiento del micelio, en comparación con el control.

Actividad antibacteriana

La actividad antibacteriana del mezquite también ha sido estudiada, como se muestra en el trabajo realizado por Thakur *et al.* (2014), donde se reportó el efecto antibacteriano de extractos obtenidos con diferentes solventes (butanol, etanol y metanol) a partir de hojas de *P. juliflora*, contra bacterias Gram-positivas (*Bacillus subtilis*, *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermis* y *Streptococcus pyogenes*) y Gram-negativas (*Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Salmonella typhimurium*). En otro estudio, Camacho *et al.* (2017) determinaron la composición química y actividad antimicrobiana del extracto etanólico de hojas de *P. pallida*. Los resultados de este estudio demostraron la presencia de taninos y compuestos fenólicos en el extracto, así como actividad antimicrobiana contra *Staphylococcus aureus*, no encontrándose efecto frente a las bacterias *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*.

Además, Gonzalez-Barron *et al.* (2020b) establecieron el efecto de la harina de mesocarpio de vaina de *P. pallida*, siendo mayor contra bacterias Gram-positivas (*Staphylococcus aureus* y *Listeria monocytogenes*) que Gram-negativas (*Escherichia coli*, *Enterobacter cloacae* y *Samonella Typhimurium*). En otro estudio, Arrascue-Rivasplata y Torres-Mestanza (2020), determinaron el efecto antibacteriano del extracto hidroetanólico de *P. padilla* sobre la bacteria *Enterococcus faecalis*. Los resultados indicaron que presentaron un efecto positivo frente a la inhibición de este patógeno. Mientras que, Amritha *et al.* (2021) demostraron que el extracto acuoso obtenido de semillas de *P. juliflora*, presentó actividad antimicrobiana frente a bacterias Gram-positivas (*S. aureus*) y Gram-negativas (*Clostridium perfringens*), y recomendaron a este extracto como posible antibiótico para el tratamiento de enfermedades infecciosas.

Actividad antioxidante

En una investigación realizada por García-Andrade *et al.* (2013) se demostró el efecto antioxidante de extractos acetónicos crudos y fraccionados obtenidos a partir de hojas de *P. laevigata*, debido a la capacidad que presentaron para atrapar radicales DPPH• y OH•. También Camacho *et*

al. (2017) determinaron la actividad antioxidante del extracto etanólico de hojas de *P. pallida*. Los resultados de este estudio establecieron que el extracto presentó un efecto inhibitorio contra los radicales DPPH• y ABTS•+, propiedades que fueron asociadas con la presencia de taninos y fenoles en el extracto. Mientras que, Aispuro-Sainz (2014) y Ramírez-Rojo *et al.* (2019) demostraron la actividad antirradical DPPH• y el poder reductor del ion férrico de extractos etanólicos de vaina de *P. velutina*.

Además, Velásquez-Jiménez (2018) en su investigación demostró la capacidad del extracto acuoso-etanólico de vaina de mezquite para reducir el ion férrico (*P. chilensis* > *P. alba*), y los radicales DPPH• y ABTS•+ (*P. chilensis* = *P. alba*). Díaz-Batalla *et al.* (2018b) indicaron que las harinas de pericarpio de la vaina, la semilla y el pericarpio de semilla de *P. laevigata*, también poseen actividad contra radicales DPPH• y ABTS•+. Mientras que, Gonzalez-Barron *et al.* (2020b) reportaron la capacidad de la harina de mesocarpio de vaina de *P. pallida* para reducir *in vitro* la oxidación de lípidos al evitar la formación de malondialdehído.

En la investigación realizada por Valencia *et al.* (2020), se determinó la actividad antioxidante de extractos obtenidos con diferentes solventes (agua, etanol, hexano y cloroformo) a partir de semilla de vaina de Prosopis. Los resultados de este trabajo mostraron que el extracto etanólico presentó la actividad antioxidante más alta, medida por el método DPPH•, la cual fue asociada a la presencia de compuestos fenólicos en el extracto. En otro estudio, Sharifi-Rad *et al.* (2021) demostraron que el extracto etanólico-acuoso (85%) de hojas *P. farcta* presentó actividad frente a los radicales DPPH• y ABTS•+, así como capacidad para reducir iones metálicos; estas propiedades fueron asociadas a la presencia de compuestos fenólicos en el extracto.

PROPIEDADES TECNO-FUNCIONALES DEL MEZQUITE

Las propiedades tecno-funcionales de los aditivos utilizados en la formulación de los alimentos o matrices alimentarias son variables, por lo que, un aditivo con múltiples funcionalidades será considerado como el óptimo para ser utilizado. Algunas de las propiedades tecno-funcionales más importantes en los alimentos son la solubilidad, absorción y retención de

agua, viscosidad, gelificación, cohesión-adhesión, elasticidad, emulsificación, absorción y retención de grasa, retención de sabor, formación de espuma, entre otras. Sin embargo, las propiedades que presente el aditivo dependerán de factores intrínsecos (composición química, conformación y reactividad, relación hidrofobicidad/hidrofilicidad, entre otros), y extrínsecos (pH, temperatura, relación hidrofobicidad/hidrofilicidad, método de extracción, entre otros) (Baracé *et al.*, 2015).

El mezquite ha sido considerado una abundante fuente de componentes funcionales de interés para la industria alimentaria (González-Montemayor *et al.* 2019). Por ejemplo, en una investigación realizada por Estévez *et al.* (2013) se evaluó el potencial de la harina de vaina de *P. chilensis* y de la fibra obtenida de esta harina. Los resultados de este trabajo indicaron que ambas harinas, presentaron capacidad para retener agua, mientras que la fibra presente en la vaina mostró la mayor capacidad de hinchamiento y alta capacidad para absorber y retener aceite. De acuerdo con los resultados, se concluyó que las propiedades tecnológicas mostradas por estas harinas permitirían su uso en alimentos, recomendándose en productos de panadería. Además, Cattaneo *et al.* (2014) reportaron que la proteína e hidrolizados proteicos obtenidos de la harina de semilla de *P. alba*, poseen capacidad de emulsificación, así como capacidad para retener aceite y agua. En base a esto, recomendaron el uso de estas harinas en la formulación de alimentos funcionales.

En otra investigación, Falade y Akeem (2020) indicaron que las harinas de la semilla e hidrolizados de *P. africana*, presentaron capacidad para retener agua y aceite, así como de emulsificación, recomendando su posterior uso para mejorar diversas formulaciones alimenticias. También, en otro estudio realizado por García-Alonzo (2020) se demostró que las harinas de vaina de *P. alba* y *P. chilensis* poseen alta capacidad para retener agua y aceite, así como alta capacidad de emulsificación, al ser comparados con un aditivo comercial (mezcla de fécula de papa y carrageninas). Además, estas harinas presentaron capacidad para gelificar de forma similar al extensor comercial. Por lo que, propusieron el uso de estas harinas como extensor en productos cárnicos emulsionados. Adicionalmente, Franco-Sarmiento & Ruz-Echavarría (2020) evaluaron las propiedades tecno-funcionales de la harina de hoja y semilla de *P. juliflora*, reportándose que la harina de semilla presentó mayor capacidad

de hinchamiento, así como de absorción y de retención de agua. Por lo que, recomendaron este aditivo para ser utilizado en la formulación de salchichas artesanales.

EL MEZQUITE COMO ADITIVO ALIMENTARIO

El *Codex Alimentarius* (1995) indica que un aditivo alimentario puede ser cualquier sustancia que en cuanto tal no se consume o utiliza normalmente como aditivo básico en alimentos, tenga o no valor nutritivo, y cuya adición sea intencionada al alimento con fines tecnológicos en sus fases (fabricación, elaboración, preparación, tratamiento, envasado, empaquetado, transporte o almacenamiento), sin afectar la salud del consumidor. Además, indica que los aditivos alimentarios deben ser empleados si estos conservan la calidad nutricional del alimento, proporcionar características nutricionales para ciertas necesidades dietéticas especiales, y aumentar la calidad de conservación o estabilidad del alimento.

Uno de los retos actuales de la industria de los alimentos es cubrir la expectativa de los consumidores que demandan más alimentos nutritivos y con propiedades promotoras de la salud (funcionales), así como reducir el uso de ciertos aditivos alimentarios asociados con efectos adversos en la salud, sin que esto afecte la calidad fisicoquímica y sensorial del producto. Por lo anterior, en diversos trabajos de investigación se ha propuesto y evaluado el uso de harinas y extractos obtenidos a partir de plantas como una estrategia para cumplir este reto de la industria de los alimentos (González-Montemayor *et al.*, 2019; Munekata *et al.*, 2020). En base a la composición química y propiedades bioactivas que presenta el mezquite, se ha propuesto el uso de sus harinas y extractos como un aditivo para alimentos (cuadro 2), incluyendo bebidas, productos de panadería, así como carne y productos cárnicos.

CUADRO 2
USO DE MEZQUITE COMO ADITIVO
EN DIFERENTES MATRICES ALIMENTARIAS

Alimento funcional	Aditivo	Resultado relevante	Referencia
Galletas	Harina de la vaina (<i>P. chilensis</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Ⓞ Color, aroma, textura y aceptación sensorial ▼ Valor de pH ▼ Valor L* (luminosidad) ▲ Capacidad para reducir iones metálicos (FRAP) ▲ Firmeza y consistencia ▼ Cohesión Ⓞ Elasticidad 	Conforti & Patrignani (2021)
Pan de trigo	Harina de mesocarpio de la vaina (<i>P. pallida</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Ⓞ Firmeza ▲ Contenido de fibra y ácidos grasos insaturados ▼ Resiliencia y actividad de agua 	Gonzales-Barron <i>et al.</i> , 2020 ^a
Salchichas	Harina de hoja y semilla (<i>P. juliflora</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▼ Sabor, color, olor, textura y aceptación sensorial ▼ Pérdida de peso por cocción ▲ Contenido de proteína Ⓞ Contenido de humedad ▼ Contenido de cenizas Ⓞ Valor de pH 	Franco-Sarmiento & Ruz-Echavarría (2020)
Galletas con sabor a chocolate	Harina de vaina de mezquite (<i>P. alba</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▲ Contenido de proteínas, fibra y minerales, compuestos antioxidantes, aceptación sensorial 	Fabiani <i>et al.</i> (2020)
Hamburguesas de cerdo	Extracto etanólico de hojas (<i>P. velutina</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Ⓞ Composición química proximal y atributos sensoriales ▲ Estabilidad del pH, capacidad de retención de agua, color rojo (a*) y actividad antioxidante total ▼ Oxidación de lípidos y proteínas 	Ramírez-Rojo <i>et al.</i> , 2019
Salchichas de cerdo	Extracto acuoso-etanólico de vaina (<i>P. alba</i> y <i>P. chilensis</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Ⓞ Valor de pH, luminosidad (L*), color rojo (a*), color amarillo (b*), capacidad de retención de agua, dureza ▲ Cuenta total de mesófilos y psicrófilos ▼ Pérdida de peso por cocción, oxidación de lípidos 	Velásquez-Jiménez <i>et al.</i> , 2018

CUADRO 2
USO DE MEZQUITE COMO ADITIVO

EN DIFERENTES MATRICES ALIMENTARIAS

(continuación)

Alimento funcional	Aditivo	Resultado relevante	Referencia
Pan "tipo panetón"	Harina de vaina (<i>P. alba</i>)	(♥) Volumen, alvéolo, cohesión, elasticidad y resiliencia (▲) Contenido de fibra y minerales, compactación, oscurecimiento, adhesividad, firmeza y aceptación sensorial	Bigne <i>et al.</i> , 2018
Pan de trigo	Harina de vaina (<i>P. alba</i>)	(♥) Volumen, alvéolo, cohesión y resiliencia (▲) Contenido de fibra, compactación, oscurecimiento, firmeza y masticabilidad	Bigne <i>et al.</i> , 2016
Hamburguesas de cerdo	Harina y extracto etanólico de vaina (<i>P. velutina</i>)	(⓪) Aceptación sensorial (♥) Luminosidad (L*), oxidación de lípidos, pérdida de peso por cocción (▲) Valor pH, color rojo (a*), amarillo (b*) y dureza	Aispuro-Sainz (2014)
Bebida proteica sabor frambuesa	Harina de vaina (<i>P. chilensis</i>)	(⓪) Color (CIEL*a*b*) (▲) Contenido de proteínas, viscosidad y aceptación sensorial	Cerezal-Mezquita <i>et al.</i> (2012)
Bizcochos	Harina de vaina (<i>P. laevigata</i>)	(▲) Contenido de fibra y minerales, así como aceptación sensorial	De la Rosa <i>et al.</i> , 2006
Barras de cereales	Cotiledón de semilla (<i>P. chilensis</i>)	(▲) Contenido de proteínas y aceptación sensorial	Estévez <i>et al.</i> (2000)
Barra de cereales	Cotiledón de semilla (<i>P. chilensis</i>)	(♥) Oxidación de lípidos (▲) Aceptación sensorial	Escobar <i>et al.</i> (2000)

(⓪) sin cambios respecto al control; (▲) incremento respecto al control; (♥) reducción respecto al control.

TENDENCIAS FUTURAS

En México las plantas pertenecientes al género *Prosopis* están ampliamente distribuidas en regiones de zonas áridas; sin embargo, es necesario realizar más trabajos de investigación en los que se aborde la obtención de harinas y/o extractos ricos en compuestos bioactivos, a partir de diferentes regiones anatómicas del mezquite. Además, es necesario evaluar las propiedades funcionales de estas harinas y extractos orientadas a su uso como aditivos alimentarios, principalmente en la industria de panadería o cárnica, debido a que son sectores en los que han sido escasamente utilizados.

En México, la Cámara Nacional de la Industria Panificadora (CANAI PAN) reportó que el consumo per cápita de pan fue de aproximadamente 33.0 kg por persona en el año 2020, y más del 70% de su consumo corresponde a pan blanco, mientras que el resto del consumo corresponde a productos como galletas, pan dulce, entre otros. Mientras que, el Consejo Mexicano de la Carne (COMECARNE) en su compendio estadístico indica que el consumo per cápita de productos cárnicos fue de 68.8 kg por persona para el mismo año, y desagregando por tipo de proteína (pollo, cerdo y res), el consumo fue de 34.1, 18.9 y 15.1 kg por persona, respectivamente. Respecto a los productos cárnicos, el consumo per cápita de fue de aproximadamente 8.0 kg por persona, de los cuales el 51% del consumo total correspondió a salchichas y jamones elaborados con carne de aves.

El incremento en el consumo de los productos de panadería y cárnicos, con lleva a la mejora y al mantenimiento de la calidad para satisfacer la demanda del consumidor. Sin embargo, la calidad puede afectarse por diversos factores durante su almacenamiento, incrementándose la pérdida de nutrientes y provocando cambios fisicoquímicos, microbiológicos y sensoriales en estos productos. Por ello, se requiere un mayor número de estudios en relación al efecto que pudiera tener el uso de estos nuevos aditivos en la calidad fisicoquímica, microbiológica y sensorial en los alimentos.

CONCLUSIONES

La obtención de harinas y extractos a partir de diferentes especies de mezquite puede ser considerada una estrategia para el desarrollo de nuevos aditivos alimentarios, debido a que en diversos estudios se ha demostrado la presencia de compuestos bioactivos (ácidos fenólicos y flavonoides) y se destacan propiedades funcionales de interés para los alimentos. Además, se ha demostrado que la inclusión del mezquite en matrices alimentarias (bebidas, productos de panadería, y productos cárnicos) mejora las características nutricionales, fisicoquímicas y sensoriales del producto.

REFERENCIAS

- AISPURO-SAINZ, K. J. (2014). Determinación del efecto de adición de harina y extracto de vaina de mezquite (*Prosopis velutina*) en un producto potencialmente funcional de carne de cerdo. Tesis de licenciatura no publicada, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. México.
- AMRITHA, A., bhuvaneshwari, G., malavika, M., & vennila, R. (2021). Comparison of antibacterial activity of extract of prosopis juliflora seeds against aerobic and anaerobic bacteria. *International Journal of Current Pharmaceutical Research*, 13(1), 32-24.
- AROYEHUN, S. A. H., Alegbeleye, W. O., Agbebi, O. T., & Akinde, A. (2021). Evaluation of fermented African mesquite seed (*Prosopis africana*) on growth and nutrient digestibility of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. *Journal of Fisheries*, 9(2), 92202-92202.
- ARRASCUE-RIVASPLATA, B., & Torres Mestanza, I. (2020). Efecto antibacteriano del extracto hidroetanólico de *Prosopis Pallida* (algarrobo) sobre *Enterococcus Faecalis*-prueba piloto *in vitro*. Tesis de licenciatura, Universidad Señor de Sipán, Perú.
- BARAC, M. B., Pešić, M. B., Stanojević, S. P., Kostić, A. Ž., & Čabrilo, S. B. (2015). Techno-functional properties of pea (*Pisum sativum*) protein isolates: A review. *Acta Periodica Technologica*, 46, 1-18.

- BIGNE, F., Puppo, M. C., & Ferrero, C. (2016). Fibre enrichment of wheat flour with mesquite (*Prosopis* spp.): Effect on breadmaking performance and staling. *LWT-Food Science and Technology*, *65*, 1008-1016.
- BIGNE, F., Puppo, M. C., & Ferrero, C. (2018). Mesquite (*Prosopis alba*) flour as a novel ingredient for obtaining a “panettone-like” bread. Applicability of part-baking technology. *LWT-Food Science and Technology*, *89*, 666-673.
- CAMACHO, C. C., Quiroz, J. R., Luna, A. C., Cevallos, N. R., Armas, J. R., & Perfecto, D. R. (2017). Actividad antibacteriana y antioxidante del extracto etanólico de las hojas de *Prosopis pallida* (algarrobo). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, *22*(4), 1-15.
- CATTANEO, F., Sayago, J. E., Alberto, M. R., Zampini, I. C., Ordóñez, R. M., Chamorro, V., Pazo, A., & Isla, M. I. (2014). Anti-inflammatory and antioxidant activities, functional properties and mutagenicity studies of protein and protein hydrolysate obtained from *Prosopis alba* seed flour. *Food Chemistry*, *161*, 391-399.
- CEREZAL MEZQUITA, P., Acosta Barrientos, E., Rojas Valdivia, G., Romero Palacios, N., & Arcos Zavala, R. (2012). Desarrollo de una bebida de alto contenido proteico a partir de algarrobo, lupino y quinoa para la dieta de preescolares. *Nutrición Hospitalaria*, *27*(1), 232-243.
- Codex Alimentarius. (1995). Norma general para los aditivos alimentarios CODEX STAN 192-1995. Consultado 10 de febrero, 2021, de http://www.fao.org/gsfaonline/docs/CXS_192s.pdf
- CONFORTI, P. A., & Patrignani, M. (2021). Increase in the antioxidant content in biscuits by infusions or *Prosopis chilensis* pod flour. *Open Agriculture*, *6*(1), 243-253.
- DE GUSMÃO, R. P., Cavalcanti-Mata, M. E. R. M., Duarte, M. E. M., & Gusmão, T. A. S. (2016). Particle size, morphological, rheological, physicochemical characterization and designation of minerals in mesquite flour (*Proposis juliflora*). *Journal of Cereal Science*, *69*, 119-124.
- DE LA ROSA, A. B., Frias-Hernández, J. T., Olalde-Portugal, V., & González Castañeda, J. (2006). Processing, nutritional evaluation, and

- utilization of whole mesquite flour (*Prosopis laevigata*). *Journal of Food Science*, 71(4), S315-S320.
- DEL VALLE, F. R., Escobedo, M., Munoz, M. J., Ortega, R., & Bourges, H. (1983). Chemical and nutritional studies on mesquite beans (*Prosopis juliflora*). *Journal of Food Science*, 48(3), 914-919.
- DÍAZ-BATALLA, L., Hernández-Uribe, J. P., Gutiérrez-Dorado, R., Téllez-Jurado, A., Castro-Rosas, J., Pérez-Cadena, R., & Gómez-Aldapa, C. A. (2018a). Nutritional characterization of *Prosopis laevigata* Legume tree (Mesquite) seed flour and the effect of extrusion cooking on its bioactive components. *Foods*, 7(8), 124.
- DÍAZ-BATALLA, L., Hernández-Uribe, J. P., Román-Gutiérrez, A. D., Cariño-Cortés, R., Castro-Rosas, J., Téllez-Jurado, A., & Gómez-Aldapa, C. A. (2018b). Chemical and nutritional characterization of raw and thermal-treated flours of Mesquite (*Prosopis laevigata*) pods and their residual brans. *CyTA-Journal of Food*, 16(1), 444-451.
- ELAIGWU, M., Oluma, H. O. A., & Onekutu, A. (2021). Phytochemical screening and antifungal activity of leaf extracts of *Prosopis africana* and *Anacardium occidentale* against macrophomina root rot of *Sesamum indicum* L. in Benue State, Central Nigeria. *Modern Advances in Geography, Environment and Earth Sciences*, 3, 57-68.
- ESCOBAR, B., Estévez, A. M., & Guíñez, M. A. (2000). Storage of cereal bars with mesquite cotyledon (*Prosopis chilensis* (Mol) Stuntz). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 50(2), 152-156.
- ESTÉVEZ, A. M., Escobar, B., & Ugarte, V. (2000). Use of mesquite cotyledon (*Prosopis chilensis* (Mol) Shuntz) in the manufacturing of cereal bars. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 50(2), 148-151.
- ESTÉVEZ, A. M., Figuerola, F., Bernuy, E., & Sáenz, C. (2013). Dietary fibre concentrate from Chilean algarrobo (*Prosopis chilensis* (Mol.) Stuntz) pods: Purification and characterization. *Food Science and Technology International*, 20(8), 629-635.
- FABIANI, G. L., Silvina, G., Costa, K., Rosas, D., & Sara, M. (2020). Applying an ingredient with antioxidant activity and its effect on the nutritional and sensory quality of cookies. *Journal of Food Chemistry Nanotechnology*, 6(3), 129-137.

- FALADE, K. O., & Akeem, S. A. (2020). Physicochemical properties, protein digestibility and thermal stability of processed African mesquite bean (*Prosopis africana*) flours and protein isolates. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(3), 1481-1496.
- FEYZMAND, S., Shahbazi, B., Marami, M., Bahrami, G., Fattahi, A., & Shokoohinia, Y. (2017). Mechanistic in vitro evaluation of *Prosopis farcta* roots potential as an antidiabetic folk medicinal plant. *Pharmacognosy Magazine*, 13(Suppl 4), S852.
- FRANCO-SARMIENTO, A. C., & Ruz-Echavarría, W. J. (2020). Elaboración de salchichas artesanales utilizando harina de trupillo (*Prosopis juliflora*) como extensor proteico. Tesis de Licenciatura, Universidad de la Costa, Colombia.
- GARCÍA-ALONZO, A. M. (2020). Composición química, propiedades físicas y tecnofuncionales de vaina de mezquite (*Prosopis* spp) para su uso como extensor en productos cárnicos emulsionados. Tesis de licenciatura no publicada, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. México.
- GARCÍA-ANDRADE, M., González-Laredo, R. F., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Rosales-Castro, M., & Medina-Torres, L. (2013). Mesquite leaves (*Prosopis laevigata*), a natural resource with antioxidant capacity and cardioprotection potential. *Industrial Crops and Products*, 44, 336-342.
- GONZALES-BARRON, U., Dijkshoorn, R., Maloncy, M., Finimundy, T., Caroch, M., Ferreira, I. C., Barros, L., & Cadavez, V. (2020a). Nutritional quality and staling of wheat bread partially replaced with Peruvian mesquite (*Prosopis pallida*) flour. *Food Research International*, 137, 109621.
- GONZALES-BARRON, U., Dijkshoorn, R., Maloncy, M., Finimundy, T., Calhelha, R. C., Pereira, C., Stojković, D., Stojković, M., Ferreira, I. C. F. R., Barros L., & Cadavez, V. (2020). Nutritive and bioactive properties of mesquite (*Prosopis pallida*) flour and its technological performance in breadmaking. *Foods*, 9(5), 597.
- GONZÁLEZ-MONTEMAYOR, Á. M., Flores-Gallegos, A. C., Contreras-Esquivel, J. C., Solanilla-Duque, J. F., & Rodríguez-Herrera, R. (2019). *Prosopis* sfunctional activities and its applications in bakery products. *Trends in Food Science & Technology*, 94, 12-19.

- HUISAMEN, B., George, C., Genade, S., & Dietrich, D. (2013). Cardioprotective and anti-hypertensive effects of *Prosopis glandulosa* in rat models of pre-diabetes. *Cardiovascular Journal of Africa*, 24(2), 10.
- JAMEEL, S., Sharif, A., Akram, M., Tabassum, T., Ahmad, S., & Khan, I. (2019). Anti-fungal activities of aqueous and organic extracts of *Prosopis Cineraria*. *National Journal of Medical and Health Sciences*, 1(1-2), 25-30.
- LÓPEZ-ANCHONDO, A. N., López-de la Cruz, D., Gutiérrez-Reyes, E., Castañeda-Ramírez, J. C., & De la Fuente-Salcido, N. M. (2021). Antifungal activity *in vitro* and *in vivo* of mesquite extract (*Prosopis glandulosa*) against phytopathogenic fungi. *Indian Journal of Microbiology*, 61(1), 85-90.
- MEHRIZI, M., Nazari, H., & Amrollahi, H. (2020). Improvement of glucose uptake in 3T3-L1 adipocyte cells by aqueous and hydroalcoholic extract of *Prosopis farcta*. *International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research*, 10(3), 123-129.
- MUNEKATA, P. E. S., Rocchetti, G., Pateiro, M., Lucini, L., Domínguez, R., & Lorenzo, J. M. (2020). Addition of plant extracts to meat and meat products to extend shelf-life and health-promoting attributes: An overview. *Current Opinion in Food Science*, 31, 81-87.
- PALACIOS, R. A. (2006). Los mezquites mexicanos: biodiversidad y distribución geográfica. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 41(1-2), 99-121.
- PÉREZ, M. J., Rodríguez, I. F., Zampini, I. C., Cattaneo, F., Mercado, M. I., Ponessa, G., & Isla, M. I. (2020). *Prosopis nigra* fruits waste characterization, a potential source of functional ingredients for food formulations. *LWT*, 132, 109828.
- RAMÍREZ-ROJO, M. I., Vargas-Sánchez, R. D., Torres-Martínez, B. D. M., Torrescano-Urrutia, G. R., Lorenzo, J. M., & Sánchez-Escalante, A. (2019). Inclusion of ethanol extract of mesquite leaves to enhance the oxidative stability of pork patties. *Foods*, 8(12), 631.
- SAMEJO, M. Q., Sumbul, A., Shah, S., Memon, S. B., & Chundrigar, S. (2013). Phytochemical screening of *Tamarix dioica* Roxb. ex Roch. *Journal of Pharmacy Research*, 7(2), 181-183.

- SHARIFI-RAD, J., Zhong, J., Ayatollahi, S. A., Kobarfard, F., Faizi, M., Khosravi-Dehaghi, N., & Suleria, H. A. (2021). LC-ESI-QTOF-MS/MS characterization of phenolic compounds from *Prosopis farcta* (Banks & Sol.) JF Macbr. and their potential antioxidant activities. *Cellular and Molecular Biology*, 67(1), 189-200.
- SHARMA, V., & Sharma, P. (2020). Phyto-therapeutic potential of stem bark of the wonder tree, *Prosopis cineraria* (L.) Druce in LPS-induced mouse model: An Anti-Inflammatory Study. *Clinical Phytoscience*, 6(1), 1-8.
- SOLANKI, D. S., Kumar, S., Parihar, K., Tak, A., Gehlot, P., Pathak, R., & Singh, S. K. (2018). Characterization of a novel seed protein of *Prosopis cineraria* showing antifungal activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 16-22.
- SONI, L. K., Dobhal, M. P., Arya, D., Bhagour, K., Parasher, P., & Gupta, R. S. (2018). *In vitro* and *in vivo* antidiabetic activity of isolated fraction of *Prosopis cineraria* against streptozotocin-induced experimental diabetes: A mechanistic study. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 108, 1015-1021.
- THAKUR, R., Singh, R., Saxena, P., & Mani, A. (2014). Evaluation of antibacterial activity of *Prosopis juliflora* (SW.) DC. leaves. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 11(3), 182-188.
- VALENCIA, D., Rueda Puente, E. O., Leyva Peralta, M. A., Mazón-López, S. R., & Ortega-García, J. (2020). Compuestos bioactivos, actividad antioxidante y perfil de ácidos grasos en aceite de semilla de Mezquite (*Prosopis* spp). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 70(1), 50-59.
- VELÁSQUEZ-JIMÉNEZ, D. (2018). Utilización de extracto de vaina de mezquite (*Prosopis alba* y *P. chilensis*) como aditivo antioxidante en salchicha de cerdo para desayuno. Tesis de licenciatura no publicada, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. México.
- YADAV, E., Singh, D., Yadav, P., & Verma, A. (2018). Antioxidant and anti-inflammatory properties of *Prosopis cineraria* based phenolic rich ointment in wound healing. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 108, 1572-1583.

CAPÍTULO 17
LA GOMA EXUDADA DEL MEZQUITE
(*PROSOPIS* SPP) COMO ESTABILIZADOR
DE HELADOS LÁCTEOS

OFELIA ROUZAUD SÁNDEZ¹

ADRIÁN GILBERTO ENCINAS CÁRDENAS²

ROSARIO MARIBEL ROBLES SÁNCHEZ³

FRANCISCO RODRÍGUEZ FÉLIX⁴

REYNA LUZ VIDAL QUINTANAR⁵

RESUMEN

La propiedad funcional de estabilizar la estructura de un sistema multi-fásico, como el de un helado lácteo, en cuya fase acuosa están dispersos cristales de hielo, glóbulos de grasa, burbujas de aire, micelas de caseína y otros cosolutos, se consigue añadiendo hidrocoloides a la mezcla de helado. Son hidrocoloides con características y funciones específicas, incluidos los efectos sobre las propiedades reológicas del helado y de la mezcla de helado, la separación de fases, el esponjamiento, la cristalización y recristalización, el comportamiento en la fusión y las características sensoriales. La goma exudada del árbol mezquite (*Prosopis spp*) tiene características estructurales y fisicoquímicas que se consideran

¹ Cuerpo Académico Físicoquímica de Biomoléculas de Alimentos, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora. Blvd. Luis Encinas y Rosales, col. Centro, C.P. 83000, Hermosillo, Son., México. Autor de correspondencia: ofelia.rouzaud@unison.mx.

² Graduado de la Licenciatura de Química en Alimentos, Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de Sonora.

³ Cuerpo Académico Físicoquímica de Biomoléculas de Alimentos, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora.

⁴ Cuerpo Académico Bioprocesos y Sistemas Agroalimentarios. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora.

⁵ Cuerpo Académico Físicoquímica de Biomoléculas de Alimentos, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora.

potenciales para estabilizar esos sistemas alimenticios. En este capítulo se presenta una recopilación de resultados de una investigación primaria y secundaria de algunos de esos aspectos, que se realizó con el objetivo de explorar la posibilidad de su utilización como hidrocoloide estabilizante en una mezcla de helado lácteo. Se analiza el efecto de la concentración en el equilibrio de las interfaces agua/aire y agua/grasa, en las características de flujo, y en los parámetros de la congelación y la descongelación.

PALABRAS CLAVE: características estructurales, características fisicoquímicas, estabilizantes, funcionalidad tecnológica, goma de mezquite, helado lácteo, hidrocoloides, sistema multifásico.

INTRODUCCIÓN

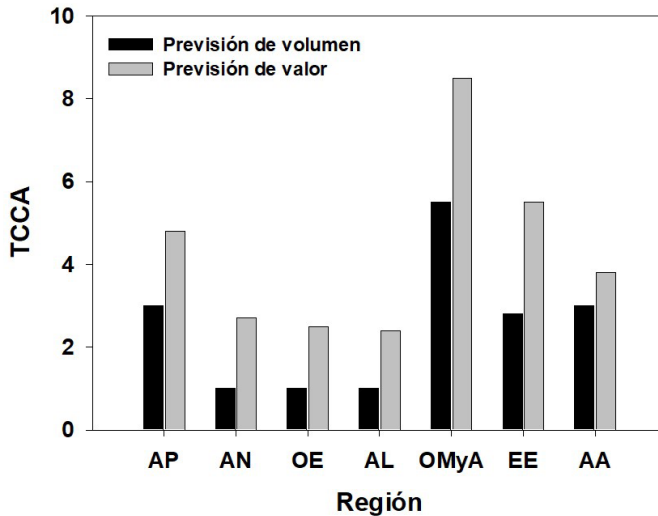
El helado lácteo es un alimento que se consume en estado congelado y se produce en un proceso concomitante de congelación y mezcla para establecer la estructura y la textura deseadas (Goff y Hartel, 2013). El helado lácteo se ha considerado durante mucho tiempo un producto que se consume principalmente por placer, pero también los tecnólogos de alimentos han trabajado para mejorar la calidad funcional y nutricional (Soukoulis *et al.*, 2014), y para algunos consumidores, en muchos países, es un portador de calorías y de nutrientes que equilibra las deficiencias nutricionales (Euromonitor, 2020).

El consumo global medio per cápita de helados lácteos en 2018 fue de 2.7 litros, que se desglosa por regiones en la figura 1, y se espera que crezca 3% en 2022. Según un informe de consumo en América Latina (Euromonitor, 2020), Chile ocupó el lugar de más alto consumo, con 8.6 litros por persona, seguido de Puerto Rico (7.9 litros/persona) y Costa Rica (3.8 litros/persona). En esta región, México ocupó el sexto lugar, con 2.3 litros por persona. La tendencia hacia la salud y el bienestar está influyendo cada vez más en la elección de alimentos del consumidor mexicano, y ante el efecto del nuevo reglamento de etiquetado, los fabricantes de helados y postres congelados se están adaptando a esta tendencia, reduciendo el contenido calórico de sus marcas y lanzando productos que contienen ingredientes de mayor calidad y más naturales o nutritivos (Euromonitor, 2020). Estos productos novedosos, al diferir en los ingredientes, pueden determinar cambios en las características tecnofuncionales y sensoriales, que requieren su atención con una mejor comprensión científica.

Uno de los principales atributos sensoriales de estos productos es la textura, cuya percepción está determinada por las características microscópicas de la red microcristalina compuesta de tres fases: líquida, sólida y aire. A su vez, la microestructura está determinada por interacciones moleculares complejas de los componentes, como proteínas, glóbulos de grasa, estabilizantes, azúcar y sales solubles e insolubles (Syed *et al.*, 2018; Varela *et al.*, 2014).

El desarrollo y estabilización de la estructura del helado es un proceso dinámico en el que los componentes principales –los biopolímeros (proteínas y polisacáridos), los glóbulos de grasa y el agua– experimentan

FIGURA 1



Previsión del volumen y del valor de consumo de helado por región, 2017-2022, expresada como tasa compuesta de crecimiento anual (TCCA). AP: Asia del Pacífico, AN: América del Norte, OE: Europa del Oeste, AL: América Latina, OMyA: Oriente Medio y África, EE: Europa del Este, AA: Australasia.

Fuente: Modificado de Euromonitor, 2020.

cambios físicos y coloidales significativos, como la hidratación de los biopolímeros, la cristalización de los glóbulos de grasa, la nucleación y cristalización del hielo, la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa, la concentración por congelación, la formación de criogeles, la separación de fases de proteína-polisacárido y la formación de enlaces entre los biopolímeros (Cook y Hartel, 2010; Goff y Hartel, 2013).

El proceso de fabricación se resume en operaciones de mezcla, pasteurización y homogenización, para después enfriar y envejecer a una temperatura de aproximadamente 4°C. Luego se agregan aromatizantes antes de que la mezcla se bombee al congelador de superficie raspada, donde aproximadamente el 50% del agua se congela y se incorpora aire al producto. Al salir del congelador, el producto blando, a aproximadamente -5 a -6°C, se introduce en su recipiente de venta menor. El helado se envía a endurecer hasta que el núcleo alcanza una temperatura de alrededor de -18°C y el 75% del agua se congela (figura 2) (Schmidt, 2004; Goff y Hartel, 2013).

FIGURA 2

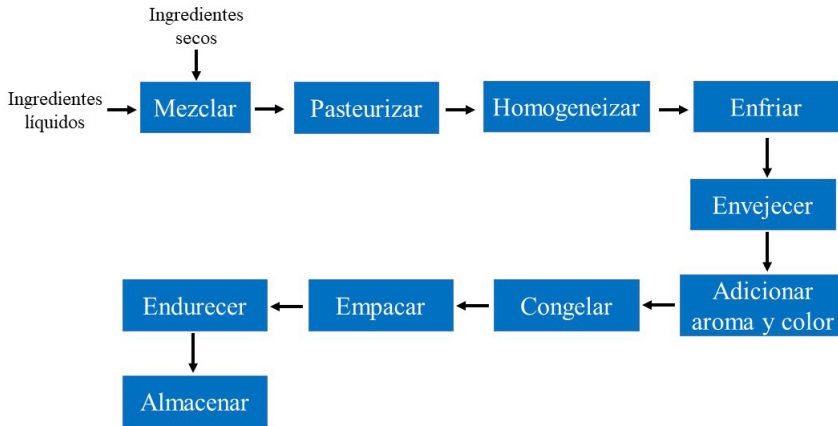


Diagrama de flujo general para el procesamiento de helados.

Fuente: Modificado de Goff y Hartel, (2013); Schmidt, (2004).

Durante las últimas dos décadas, la ciencia y la tecnología del helado ha experimentado un progreso notable en la exploración y comprensión de las interacciones entre la estructura, la textura y la estabilidad en el almacenamiento. Esto ha permitido a los tecnólogos alimentarios dar cuenta de la incorporación de ingredientes novedosos o funcionales en sistemas de helados modelo o reales, con el fin de no sólo proporcionar tecnofuncionalidad personalizada, sino mejorar aspectos relacionados con la salud y la nutrición. La propiedad de estabilizar este sistema multifásico se consigue con hidrocoloides. Las acciones físicas y químicas de estos ingredientes se basan en los mecanismos propios que incluyen la presencia de grupos funcionales cargados, regiones hidrófobas y capacidad de retención de agua. Los avances en este ámbito han llevado a la inclusión de una gama amplia de estabilizantes derivados de diversas fuentes (Javidi *et al.*, 2016), que en general impiden el crecimiento de los cristales de hielo y la sublimación del agua, al tiempo que aumentan la viscosidad de la mezcla, la suavidad sensorial y la estabilidad de la espuma (Goff y Hartel, 2013).

Los estabilizantes de origen natural que se utilizan con mayor frecuencia son las gomas de guar (de la semilla de *Cyamopsis tetragonoloba*), de algarrobo (de la semilla de *Ceratonia siliqua*) y eventualmente

La goma exudada del mezquite (*Prosopis* spp.) como estabilizador de helados ...

la arábigo (exudado de *Acacia nilotica*). La producción de estas gomas se ve afectada por las condiciones climáticas y políticas, y también por problemas laborales en los países de origen (Barak *et al.*, 2020). La goma exudada del mezquite (*Prosopis* spp.), un árbol que crece en regiones semidesérticas de México, podría ser una alternativa para esas gomas. La goma de mezquite tiene características estructurales y fisicoquímicas que se consideran apropiadas para estabilizar ese sistema alimenticio.

En este capítulo se presenta una recopilación de resultados de una investigación primaria y secundaria de la ciencia del helado, que se realizó con el objetivo de explorar la posibilidad de utilizar la goma de mezquite (*Prosopis* spp.) como estabilizante en una mezcla de helado lácteo. Se analiza el efecto de la concentración en el equilibrio de las interfaces agua/aire y agua/grasa, en las características de flujo y en los parámetros de la congelación y la descongelación.

ESTRUCTURA DEL HELADO LÁCTEO

El helado es un alimento complejo para cuya elaboración es fundamental contar con ingredientes de calidad excelente, con una mezcla formulada y equilibrada a fin de lograr un funcionamiento correcto de cada componente. Los ingredientes fundamentales de la mezcla de helado, en su forma más rudimentaria, son leche, crema o nata y azúcar. Esta formulación cambia a medida que surgen demandas del mercado, en respuesta a una población más interesada en el contenido de nutrientes y ante la necesidad de aumentar la estabilidad durante el almacenamiento en congelación a largo plazo (Hartel *et al.*, 2017). Además, hay que agregar una serie de otros factores que deben lograrse, tales como la capacidad de derretirse apropiadamente al consumirse y proporcionar un nivel de confort y de disfrute para quien lo come (Varela *et al.*, 2014).

La microestructura del helado, incluida la distribución del tamaño y la conectividad de cada fase, no sólo se logra mediante parámetros específicos de procesamiento, sino también mediante la adición o manipulación deliberada de los ingredientes.

ELEMENTOS ESTRUCTURALES

La mezcla, que se produce fuera o en la fábrica de helados, contiene los ingredientes agua, grasa, sólidos lácteos no grasos (micelas de caseína, proteínas del suero, lactosa y sales de leche), azúcares (sacarosa y almidón parcialmente hidrolizado, glucosa, maltosa y sacáridos superiores), estabilizantes, y emulsionantes. El aire se agrega durante la congelación dinámica. Todos estos elementos contribuyen a la estructura, que se describe a continuación.

La fase sérica

La fase sérica consiste en agua, azúcares (sacarosa y lactosa), proteínas y estabilizantes. Durante la congelación, e incluso a las temperaturas de almacenamiento más frías, no toda el agua se congela. Esta agua no congelada de la fase sérica se concentra y forma la película o laminilla, que se ubica entre las otras estructuras (cristales de hielo, aire, glóbulos de grasa, micelas, etc.) y las mantiene unidas en la matriz (Hartel *et al.*, 2017).

La concentración por congelación causa cambios significativos en la fase sérica, como aumento de la viscosidad, por lo que la depresión del punto de congelación es un aspecto crítico que controlar. La depresión del punto de congelación es función de la concentración molar de solutos presentes en la solución (ley de Raoult); por lo tanto, los azúcares mono y disacáridos (sacarosa y lactosa) y las sales de la leche son los que más contribuyen a la depresión del punto de congelación (Goff y Hartel, 2013).

Los cristales de hielo

Los cristales de hielo son un componente integral del helado. Deben ser tan pequeños para proporcionar una sensación suave en la boca y derretirse fácilmente a la temperatura bucal. Los cristales de hielo, por lo general, varían en tamaño desde unas pocas micras hasta más de 100 μm , con un tamaño promedio entre 35 y 45 μm para helados endurecidos (Cook y Hartel, 2010).

Los cristales de hielo se forman en la etapa de congelación dinámica (figura 2). En esta etapa, la mezcla no congelada entra en contacto con una superficie fría o refrigerante y se inicia la congelación. Después de la congelación dinámica, aproximadamente la mitad del agua se congela, pero depende del punto de congelación de la mezcla. En la etapa de endurecimiento, el volumen de la fase de cristales de hielo aumenta a medida que disminuye la temperatura, y el proceso sigue por lo general la curva de depresión del punto de congelación. Después del endurecimiento, cerca del 75 al 80% del agua se congela, según la temperatura de almacenamiento (Cook y Hartel, 2010; Goff y Hartel, 2013).

La cantidad y el tamaño de los cristales de hielo afectan numerosos atributos del producto terminado, desde la capacidad de cuchara y la dureza hasta el efecto de enfriamiento y las tasas de fusión en la boca (Goff y Hartel, 2013). La definición de cada uno de estos atributos de textura es: la capacidad de cuchara o firmeza manual es la fuerza necesaria para extraer una cucharada de helado del contenedor; dureza oral es la fuerza necesaria para comprimir la muestra entre la lengua y el paladar; grado de hielo es la cantidad de cristales de hielo que se sienten en la boca durante la masticación; tasa de derretimiento es la velocidad a la que el helado cambia de sólido a líquido (Dooley *et al.*, 2010).

El tamaño y la distribución promedio de los cristales de hielo no sólo dependen del diseño de la operación de congelación, sino del tipo y cantidad de ingredientes en la mezcla de helado (Goff y Hartel, 2013).

La emulsión

La emulsión aceite en agua en la mezcla no congelada estabiliza la interfase de aire y agua, formando una película delgada, donde, en las etapas de homogenización y congelación, parte de la grasa forma una estructura agregada tridimensional que proporciona integridad estructural, proceso que se conoce como coalescencia parcial o desestabilización de la grasa (figura 3). Este proceso es de particular importancia cuando la contribución estructural del hielo es relativamente débil, esto es, antes del endurecimiento o durante la fusión (Goff y Hartel, 2013; Syed *et al.*, 2018; Varela *et al.*, 2014).

Como regla general, se seleccionan grasas lácteas fraccionadas o grasas no lácteas, que proporcionen alrededor de 50 al 70% de grasa sólida a 4° C. Demasiada grasa sólida conduce a una coalescencia parcial insuficiente que no formará la estructura deseada (Sung y Goff, 2010).

Desde hace mucho tiempo se ha demostrado y reconocido la importancia de los emulsionantes para la formación de la estructura durante la etapa de congelación, que es cuando la emulsión se somete a las fuerzas de cizallamiento en el congelador de superficie raspada y la membrana delgada creada durante la homogenización no es suficiente para evitar que los glóbulos de grasa se unan durante la colisión (Goff, 1997).

Después de la congelación dinámica, los glóbulos de grasa presentes como glóbulos de grasa individuales o como glóbulos de grasa parcialmente fusionados, en forma de racimos, tienen un tamaño promedio de 0.5 a 3 µm y de 5 a 80 µm (Goff y Hartel, 2013), respectivamente. Los agregados de grasa contribuyen a la sequedad en la extrusión para un buen moldeado, una lentitud de fusión, un cierto grado de retención de la forma durante la fusión y una suavidad durante el consumo. En conclusión, la desestabilización de la grasa no sólo influye en las propiedades sensoriales y la resistencia a la fusión, sino que también afecta las propiedades reológicas de la matriz del helado (Amador *et al.*, 2017; Warren y Hartel, 2014, 2018).

FIGURA 3

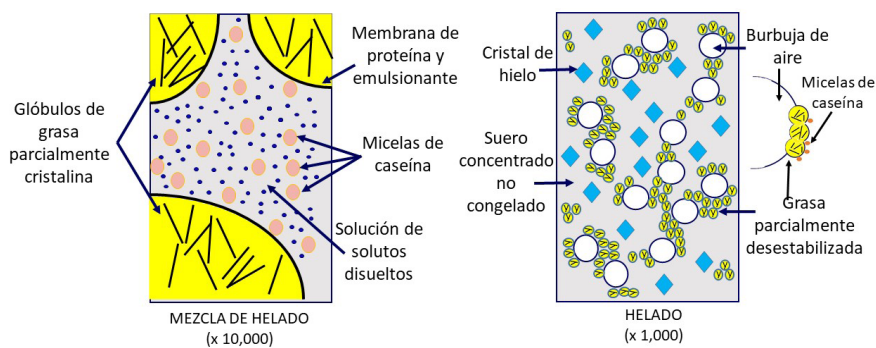


Ilustración de la estructura de la mezcla de helado y del helado.

Fuente: Modificada de Goff y Hartel (2013).

Las celdas de aire

La fase gaseosa en el helado se puede representar por la cantidad de aire incorporado o por el esponjamiento (del inglés *overrun*) y por la distribución del tamaño de las celdas de aire. El *overrun* es el aumento del volumen de aire incorporado como porcentaje del volumen de la mezcla, que puede variar desde un mínimo del 25% hasta un máximo del 150% (Goff y Hartel, 2013). El *overrun* se puede controlar fácilmente en congeladores continuos de superficie raspada, en el que las celdas de aire se forman simultáneamente con la congelación (Sofjan y Hartel, 2004).

En los congeladores continuos, el aire se inyecta en forma de pequeñas burbujas bajo presión, mientras que en los congeladores discontinuos el aire se incorpora mediante el plegado y mezclado del líquido. En ambos casos, la incorporación de aire es rápida, en segundos; y al mismo tiempo, la viscosidad de la matriz circundante aumenta de manera exponencial debido a la congelación, de modo que las burbujas de aire, después de su formación, quedan atrapadas físicamente en una matriz semisólida (figura 3), lo que dificulta su colapso (Goff y Hartel, 2013; Goff y Hartel, 2004).

La pérdida de aire puede conducir a un defecto conocido como contracción, cuya ocurrencia es bastante común y es responsable de la pérdida de calidad y de aceptabilidad del producto (Goff y Hartel, 2004; Varela *et al.*, 2014). El aire incorporado puede proporcionar una textura más suave, mayor resistencia al derretimiento y menor dureza (Sofjan y Hartel, 2004).

La fase hidrocoloide

La mezcla para helado contiene caseínas y proteínas del suero en una proporción que depende de las fuentes lácteas utilizadas en la formulación. Las caseínas están formando micelas con un tamaño medio de aproximadamente 0.3 a 0.4 μm , mientras que las proteínas del suero están disueltas en la fase acuosa. Las proteínas se adsorben en la interfase de la grasa y contribuyen a la estabilidad de la emulsión, y también se adsorben en la interfase del aire y contribuyen a la estabilidad de las

burbujas de aire. Las proteínas que no se adsorben se concentran en la fase de suero no congelado, donde contribuyen a las propiedades de viscosidad y de retención de agua (Adapa *et al.*, 2000; Goff y Hartel, 2013).

Los polisacáridos también se agregan a la mezcla del helado para aumentar la viscosidad de la solución y modificar las propiedades de la fase no congelada, en particular para controlar la recristalización del hielo. También se concentran en la fase del suero no congelado. Los polisacáridos que se utilizan en la fabricación de helados son todos incompatibles en solución con las proteínas de la leche, en especial con las micelas de caseína y, en menor medida, con las proteínas del suero, lo que da un efecto microscópico o macroscópico (visual) de separación de fases. Debido a que estos dos tipos de moléculas son hidrocoloides poliméricos grandes, su comportamiento en la fase no congelada se rige principalmente por sus interacciones, cuya explicación se puede leer en Adapa *et al.* (2000) y consultando a Goff y Hartel (2013).

Efecto de la estructura sobre las propiedades físicas

La mezcla de helado contiene glóbulos de grasa parcialmente cristalinos y micelas de caseína como partículas distribuidas en una solución de azúcares, sales, proteína de suero dispersa, estabilizantes, entre otros componentes menores (figura 3). En la superficie de los glóbulos de grasa se manifiesta la adsorción competitiva de las micelas de caseína, de las proteínas globulares del suero parcialmente desnaturalizadas, de las β -caseínas y de los emulsionantes añadidos (Goff y Hartel, 2013).

El helado contiene cristales de hielo, las burbujas de aire y los glóbulos de grasa parcialmente unidos como fases distribuidas en el suero no congelado que contiene el material disuelto (figura 3). Los aglomerados de grasa parcialmente fusionados se adsorben en la superficie de las burbujas de aire, que también están rodeadas de proteína y emulsionante, y unen las burbujas a través de películas o laminillas entre ellas (Goff y Hartel, 2013). La formulación y las condiciones del proceso influyen en esas estructuras, las cuales, a su vez, influyen en la percepción del consumidor. Desde la apariencia hasta el efecto de enfriamiento en la boca durante su consumo, los elementos microestructurales –incluidos

La goma exudada del mezquite (*Prosopis* spp.) como estabilizador de helados ...

los cristales de hielo, las burbujas de aire, los glóbulos de grasa y la fase sérica— gobiernan la percepción del consumidor (Varela *et al.*, 2014).

El helado endurecido, idealmente, se almacena a temperaturas por debajo de -20°C , para minimizar los cambios en la microestructura, ya que estos cambios por lo general causan deterioro de la calidad. Sin embargo, para el consumo, el helado debe calentarse y, a medida que aumenta la temperatura, el volumen de la fase de hielo disminuye de acuerdo con la curva de depresión del punto de congelación. Por tanto, son importantes los efectos del aumento de temperatura, en el ambiente y en la boca, sobre las propiedades termofísicas, como la difusividad térmica.

Difusividad térmica

La energía asociada con los cambios en la temperatura del helado se debe tener en cuenta en un balance de energía. Por lo general, este fenómeno se maneja mediante una propiedad térmica llamada difusividad térmica, que explica tanto la conductividad térmica como el calor específico. Físicamente, la difusividad térmica relaciona la capacidad de un material para conducir el calor con su capacidad para almacenarlo. La medición directa de la difusividad térmica es poco común. Tampoco hay un modelo disponible para predecir directamente la difusividad térmica por debajo de un punto de congelación. La difusividad térmica aparente de un alimento congelado se calcula por lo general a partir de valores conocidos de conductividad térmica, densidad y calor específico utilizando la siguiente ecuación (Wang y Weller, 2012):

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

donde k es la conductividad térmica ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$), ρ es la densidad (kg m^{-3}) y C_p es el calor específico ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$).

No está claro cuán variable es la difusividad térmica para diferentes helados, ya que esto no se ha estudiado (o publicado). Los factores que se espera que afecten la difusividad térmica incluyen el *overrun*, la distribución del tamaño de las celdas de aire, la cantidad de fase de hielo y el tamaño

de los cristales de hielo (Akbari *et al.*, 2016). Se esperaría que el aumento tanto de la cantidad y de la dispersión de las celdas de aire como de la cantidad y la dispersión de los cristales de hielo redujeran la difusividad térmica, para dar como resultado una fusión o derretimiento más lentos.

Propiedades de fusión

El derretimiento del helado es importante en dos situaciones: derretimiento en la boca durante el consumo y derretimiento relacionado con el almacenamiento a temperaturas templadas. Cada una de las estructuras o fases discutidas en la sección anterior influye en cómo se derrite el helado cuando se deja a temperatura ambiente. A medida que el calor penetra en el helado y el hielo se derrite, el agua del hielo derretido debe difundirse y mezclarse con la fase sérica más concentrada. Esta fase de suero diluido y menos viscoso luego se drena a través de las estructuras restantes y de una criba en la que generalmente se realiza la prueba de fusión (Kaleda *et al.*, 2018). Algunos helados se derriten y fluyen en su totalidad a través de la criba, dejando sólo residuos restantes, mientras que otros helados colapsan sólo de forma leve, dejando una estructura casi intacta que permanece en la criba. La cantidad de cada elemento estructural, su tamaño o estructura interna, y su nivel de interconexión en el helado derretido, influyen en la capacidad de drenaje del suero diluido (Goff y Hartel, 2013).

Algunos de los factores que influyen en la velocidad de fusión son la capacidad del calor para penetrar en el helado (difusividad térmica), que afecta la velocidad de fusión, y existe una relación directa entre ambos; un mayor *overrun*, pues al proporcionar un efecto de aislamiento, también disminuye la velocidad de fusión porque puede disminuir la difusividad térmica (Akbari *et al.*, 2016; Goff y Hartel, 2013). El contenido de grasa de leche o de aceites vegetales influyen en la velocidad de fusión. A medida que aumenta el contenido de grasa de un helado, disminuye su velocidad de fusión. Se ha sugerido que los grupos y aglomerados de glóbulos de grasa pueden estabilizar las burbujas de aire en la estructura del helado (figura 3), y, en consecuencia, pueden disminuir la velocidad de fusión (Akbari *et al.*, 2016).

La naturaleza de la fase de hielo afecta la fusión a través de la transferencia de calor y el proceso de fusión y dispersión del agua derretida en la fase de suero. El aumento del volumen de la fase de hielo por lo general aumenta el número y la superficie de los cristales de hielo, por lo que se podría esperar que se redujera la velocidad de fusión (Guo *et al.*, 2018). La adición de algunos hidrocoloides, como la carragenina, al mismo tiempo que cambian la estructura del producto e influyen en la organización de la movilidad del agua, afectan las condiciones de transferencia de calor, alargando el tiempo total de congelación (Kaminska-Dworznicka *et al.*, 2020), por lo que se pudiera disminuir la velocidad de derretimiento.

La viscosidad de la fase sérica no congelada es un componente crucial que controla la estabilidad microestructural del helado y que ralentiza de manera significativa la velocidad de fusión (Goff y Hartel, 2013). Actúa como depósito del agua disuelta del hielo durante el calentamiento y como suministro de agua para la recristalización de los cristales de hielo durante el ciclo de enfriamiento. La red de la fase no congelada, reforzada por los cristales de hielo distribuidos y los hidrocoloides disueltos, mantiene unida toda la estructura e influye en gran medida en su estabilidad cuando se somete a variaciones de temperatura externas (Guo *et al.*, 2018). La fase sérica más viscosa, especialmente después de haber sido diluida con hielo derretido, drenará de forma más lenta a través de los espacios lamelares entre las celdas de aire, aunque es posible que otras propiedades reológicas, como el límite elástico, también influyan en el goteo (Goff y Hartel, 2013).

Aunque se han realizado numerosos estudios sobre la fusión del helado, aún es limitado el conocimiento detallado de los pasos específicos que ocurren cuando el hielo se derrite y las estructuras colapsan. Se necesitan métodos para caracterizar mejor el helado a medida que se derrite. Uno de esos métodos potenciales, la tomografía de rayos X sincrotrón 4D, ya se utilizó para cuantificar el mecanismo de fusión y recristalización de los cristales de hielo (Guo *et al.*, 2018). Los hallazgos mejoraron la comprensión de los mecanismos que controlan la evolución microestructural del helado, pero aún se necesita más investigación para entender la reducción continua del volumen de la celda de aire.

Propiedades reológicas

Los componentes estructurales, en mayor o menor medida, han mostrado influencia en la mayoría de las propiedades reológicas, y por eso son una herramienta útil para caracterizar la disposición estructural en el helado (Freire *et al.*, 2020).

La dureza del helado es una propiedad importante ya que afecta de forma directa a la capacidad de cuchara. La dureza es directamente proporcional a la temperatura del helado. La temperatura fría indica un volumen alto de la fase de hielo, lo que dificulta la penetración de una cuchara en el producto. La solución del consumidor es calentar el producto, ya sea dejando el recipiente a temperatura ambiente durante un breve tiempo o calentándolo un poco en el microondas. Una vez que el helado alcanza una temperatura más cálida, se ha derretido suficiente hielo, de modo que la dureza ha disminuido para permitir sacarlo de manera más fácil. Esto demuestra la influencia de la temperatura en el volumen de la fase de hielo y que el método de medición estándar para la dureza del helado es la prueba de penetración (Goff y Hartel, 2013).

Recientemente, los investigadores del helado han utilizado una combinación de mediciones reológicas oscilatorias, transitorias y de gran deformación para adquirir información sobre la disposición intrínseca de los componentes estructurales que determinan el comportamiento reológico en la matriz del helado y que influyen de manera directa en las propiedades sensoriales y de fusión (Freire *et al.*, 2020).

En la aplicación de la técnica de cizallamiento oscilatorio de ángulo pequeño, la muestra de helado se expone a una entrada sinusoidal de ángulo pequeño (cizallamiento o deformación) y se registra la respuesta del helado (deformación o cizallamiento, respectivamente). Los niveles muy bajos de cizallamiento o deformación aplicados, dentro de la región viscoelástica lineal del helado, significan que las estructuras no se rompen (como en la prueba de penetración) (Goff y Hartel, 2013). La relación entre el módulo de pérdida y el módulo de almacenamiento, o $\tan(\delta)$, proporciona un índice de características similares de líquido a sólido, con valores de $\tan(\delta)$ que varían desde cerca de cero para un sólido elástico hasta más de uno para los fluidos (Tabilo-Munizada y Barbosa-Cánovas, 2005). El cambio en los módulos de almacenamiento

La goma exudada del mezquite (*Prosopis* spp.) como estabilizador de helados ...

y de pérdida a medida que aumenta la temperatura del helado se explican en estudios publicados desde 1995 a la fecha (Freire *et al.*, 2020; Goff *et al.*, 1995; Granger *et al.*, 2005; Wildmoser *et al.*, 2004).

TIPOS DE ESTABILIZANTES Y SU FUNCIÓN EN EL HELADO LÁCTEO

Los estabilizantes son un grupo de compuestos, por lo general gomas alimenticias de polisacáridos, que se encargan de aumentar la viscosidad de la mezcla y de la fase descongelada del helado. Ésta y otras propiedades funcionales se enumeran a continuación (Goff y Hartel, 2013):

- Incrementar la viscosidad de la mezcla.
- Estabilizar la mezcla para evitar la separación del suero.
- Ayudar en la suspensión de partículas aromatizantes.
- Producir una espuma estable en el congelador con corte fácil y rigidez para el empaque.
- Retardar o reducir el crecimiento de cristales de lactosa y de hielo durante el almacenamiento, en especial durante los periodos de fluctuación de temperatura, conocidos como choque térmico.
- Ralentizar la migración de humedad del producto al empaque o al ambiente.
- Ayudar a prevenir la contracción del volumen del producto durante el almacenamiento.
- Proporcionar uniformidad al producto y resistencia a la fusión.
- Producir una textura cremosa durante el consumo.

La mayoría de los fabricantes de helados utilizan mezclas comerciales de estabilizantes y emulsionantes formuladas por empresas especializadas. Estas mezclas suelen ser combinaciones de estabilizantes y emulsionantes, pero a veces se las denomina abreviadamente estabilizantes.

Los estabilizantes funcionan de manera muy diferente a los emulsionantes. Los estabilizantes son macromoléculas muy grandes y voluminosas. Tienen una gran capacidad para interactuar con el agua a través de la hidratación y la hinchazón, y así ocupan un gran volumen en la

solución y, a suficiente concentración, se enredan e interactúan entre sí. Por tanto, también se les conoce como hidrocoloides (Hoeffler, 2004).

Tipos de estabilizantes

La inclusión de sistemas estabilizantes ha sido una rutina en el diseño de mezclas de helado. Los avances científicos sobre los mecanismos fisico-químicos involucrados en la estabilización han llevado a la utilización de una amplia gama de estabilizantes derivados de una variedad de fuentes. Estos hidrocoloides estabilizantes son típicamente de naturaleza carbohidrato, pero pueden contener componentes proteicos. Los estabilizantes utilizados en helados lácteos se clasifican en las siguientes categorías (los que se utilizan con más frecuencia se señalan con un asterisco):

Proteínas	Gelatina, proteínas estructuradoras de hielo.
Exudados de plantas vegetales	Goma arábica, ghatti, karaya y tragacanto.
Gomas de semillas	Algarroba*, guar*, psyllium, almidón y almidones modificados.
Gomas microbianas	Xantano.
Extractos de algas	Agar, alginatos, carragenina*.
Pectinas	Bajo y alto metoxilo.
Celulósicos	Carboximetilcelulosa de sodio* (goma de celulosa), celulosa microcristalina (gel de celulosa), metil y metiletilcelulosas, hidroxipropil e hidroxipropilmetilcelulosas.

Modificado de Goff y Hartel (2013).

Algunos de esos estabilizantes y sus características, en específico, los exudados de plantas de las zonas áridas y las gomas de semillas se describen a continuación.

Exudados vegetales

Algunas plantas producen exudados o gomas en sus troncos y ramas como resultado de los mecanismos de protección contra lesiones mecánicas o microbianas (Barak *et al.*, 2020). La mayoría de las gomas exudadas pertenecen a la familia de las leguminosas como la *Acacia* spp, fuente de la goma de acacia o goma arábica; la *Astragalus* spp., como fuente de tragacanto y la *Sterculia* spp., que exuda la goma karaya (Barak *et al.*, 2020).

Los exudados de goma de las especies *Acacia senegal* y *Acacia seyal* se utilizan comercialmente como estabilizantes (goma arábica - Sistema de numeración internacional - INS - E414) en productos alimenticios (FDA, 2019). Se sabe que la goma de *A. senegal* tiene mejores propiedades interfaciales que la goma de *A. seyal*, por lo que presenta mejores propiedades de emulsificación y estabilización; ésta es una de las características que hacen que la goma de *A. senegal* sea la más utilizada comercialmente (Anjo *et al.*, 2021).

La goma de tragacanto tiene una larga historia de uso seguro como espesante, aglutinante y emulsionante. La goma de tragacanto se puede utilizar de forma muy eficaz en helados como estabilizante para una textura suave y cuerpo blando. Mantiene estas cualidades durante el almacenamiento minimizando la recristalización inducida por las fluctuaciones de la temperatura del congelador (Barak *et al.*, 2020). Utilizada al 0.2-0.5% en helados, la goma emulsiona la grasa láctea, controla el crecimiento de cristales de hielo y reduce la migración de agua y el crecimiento de cristales durante el almacenamiento (Barak *et al.*, 2020).

La goma de karaya, al 0.2-0.4% sola o al 0.15% con goma de algarrobo al 0.15%, estabiliza helados, polos de hielo y sorbetes al evitar la formación de grandes cristales de hielo, y la migración de agua libre o sinéresis debido a su excelente propiedad de unión al agua. También ayuda a controlar el *overrun* y minimizar la contracción (Barak *et al.*, 2020).

El uso de la goma de karaya y de la goma de tragacanto en aplicaciones de helado es ahora poco común. El precio de ambas gomas ha aumentado en los últimos años debido a la escasez de suministro y a la competencia de las gomas guar, celulosa o xantana, lo que ha causado una reducción de su presencia en el mercado de alimentos. La goma de

acacia o goma arábica también es un ejemplo de precios volátiles y disponibilidad (Market Analysis Report, 2019). Gran parte de la goma arábica del mundo proviene principalmente de Sudán. La disponibilidad y el precio de la goma arábica dependen de las condiciones sociopolíticas en Sudán, a pesar de los esfuerzos en otros países, como Nigeria y Chad, para diversificar la disponibilidad de esta materia prima (Barak *et al.*, 2020).

En este contexto, se están estudiado gomas exudadas de otros árboles de zonas áridas, como la del mezquite (*Prosopis* spp.), que ha mostrado tener una estructura y propiedades fisicoquímicas semejantes a la goma arábica (López-Franco *et al.*, 2012) que sugieren su uso como estabilizante en una formulación láctea para helado (Encinas-Cárdenas, 2016).

Gomas de semillas

Las gomas de semillas son galactomananos no iónicos que actúan como carbohidratos de reserva y se encuentran en las paredes celulares del endospermo, que se desarrolla junto con el germen. El endospermo en sí está protegido por una cubierta de la semilla. Estas gomas se producen quitando la capa externa de la semilla y triturando el endospermo (Wielinga, 2010).

Las gomas derivadas de las semillas del algarrobo (*Ceratonia siliqua*) y de la planta de guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) son las que más se utilizan en la industria de los helados (Goff y Hartel, 2013).

Las dos gomas de semillas espesan los sistemas acuosos de manera muy eficiente, controlando así la movilización del agua. Esto influye en la consistencia, el cuerpo y la vida útil de los sistemas alimentarios acuosos y la estabilización de las emulsiones de aceite en agua y agua en aceite. En combinación con cantidades menores de carragenina y mezcladas con el emulsionante apropiado, permiten la producción de helado con una vida útil de al menos dieciocho meses, en condiciones de almacenamiento bien controladas, sin grandes cambios en la calidad. Estas gomas pueden controlar la retención de la forma y la fusión de los productos congelados y protegerlos contra el choque térmico (Wielinga, 2010; Yousefi y Jafari, 2019).

FUNCIONES DE LOS ESTABILIZANTES

Los estabilizantes son sustancias que, a pesar de su bajo nivel de concentración en la mezcla de helado, tienen funciones muy importantes en los helados, que se describen brevemente a continuación.

Hidratar

Para lograr la funcionalidad óptima de los estabilizantes, es importante asegurarse de que el hidrocoloide esté totalmente hidratado antes de su uso. Se sabe que varios factores influyen en el proceso de hidratación o disolución, incluido el peso molecular y la concentración, así como también las condiciones ambientales, como la temperatura y el pH, y la presencia de cosolutos como la sacarosa y las sales. El principal determinante de la cinética de hidratación es el tamaño de las partículas, que refleja la superficie expuesta al agua. La velocidad y el grado de hidratación de las gomas son determinantes para su funcionalidad (Bahramparvar y Tehrani, 2011; Hoeffler, 2004). Esta capacidad de interactuar con el agua, y en concentración suficiente, enredarse e interactuar entre sí, modifica en gran medida las características reológicas de las soluciones y da lugar a sus propiedades funcionales (Goff y Hartel, 2013).

Aumentar la viscosidad

La viscosidad, que es una de las propiedades reológicas más importantes de la mezcla del helado y de la porción no congelada del helado, está influida por la composición de la mezcla, principalmente los estabilizantes y las proteínas, del tipo y la calidad de los ingredientes, del procesamiento y la manipulación de la mezcla, del contenido de sólidos totales y de la temperatura (Goff y Hartel, 2013). Sin duda, la viscosidad de la mezcla de helado se establece principalmente por el tipo y el nivel de los estabilizantes (Syed *et al.*, 2018).

La textura suave y la sensación refrescante, que son los atributos más comúnmente deseados del helado durante el consumo, podrían ser

proporcionados por una mezcla de helado con propiedades reológicas óptimas. Las mezclas de helado exhiben un comportamiento pseudoplástico no newtoniano, lo que significa que existe una relación no lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte, con la viscosidad aparente, que disminuye al aumentar la velocidad de corte. La pseudoplasticidad o comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento se ha relacionado con el aumento de la alineación de las moléculas constituyentes del sistema (Li *et al.*, 2009). Por lo general, el modelo de ley de potencia se utiliza para ajustar las propiedades reológicas de la mezcla del helado:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n$$

donde τ es el esfuerzo cortante (Pa), K es el índice de consistencia ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$), $\dot{\gamma}$ es la velocidad de corte (s^{-1}) y n es el índice de comportamiento del flujo (adimensional). Cuanto menor es el valor n , mayor es la desviación del comportamiento newtoniano y, por tanto, mayor es la pseudoplasticidad. El índice de consistencia, que se considera una medida de la naturaleza viscosa del alimento, aumenta con la concentración de estabilizante. Se ha informado que las gomas neutras exhibieron un mayor aumento en el comportamiento no newtoniano con la concentración que las gomas aniónicas (Bahramparvar y Tehrani, 2011). El aumento de la viscosidad de la fase sin congelar del helado es uno de los mecanismos que se han hipotetizado como efecto de los estabilizantes sobre la recristalización (Goff y Hartel, 2004).

Mejorar la aireación

Los helados generalmente se airean y se caracterizan como espumas congeladas. El aumento del volumen del helado es una de las funciones de los estabilizantes, que se logra mediante el aumento de la viscosidad y el mantenimiento de las burbujas de aire. La cantidad de aire en el helado es importante porque influye en la calidad y en las ganancias, pero también debido a los estándares legales que se deben cumplir. Además, la estructura de la celda de aire ha demostrado ser uno de los principales factores que influyen en la velocidad de fusión y en la retención de la forma durante la fusión, y en las propiedades reológicas en el estado

fundido, que se correlacionan con la cremosidad. Las celdas de aire más pequeñas mejoran la calidad del producto con respecto a esos tres indicadores (Bahramparvar y Tehrani, 2011).

Los cambios en el tamaño de las celdas de aire podrían atribuirse directamente a cambios en las propiedades reológicas del helado durante la congelación. A medida que avanza la congelación, aumenta la viscosidad aparente, lo que provoca una reducción en el tamaño máximo de la celda de aire debido al esfuerzo de cizalla aplicado en el congelador (Chang y Hartel, 2002).

Los cambios en las celdas de aire durante el almacenamiento del helado se deben a cuatro mecanismos principales: desproporción (maduración de Ostwald), coalescencia (fusión de burbujas vecinas), drenaje (que conduce a una distribución desigual del aire, especialmente a temperaturas más cálidas cuando el helado aún está blando) y distorsión de las burbujas de aire por el crecimiento de cristales de hielo durante el endurecimiento, lo que lleva a la ruptura de las interfaces de las burbujas de aire si la membrana no está suficientemente estabilizada. Se encontró que las tasas de cambio en las celdas de aire basadas en estos mecanismos dependen tanto de las condiciones del proceso (temperatura de almacenamiento) como de la formulación (emulsionante y estabilizante) (Bahramparvar y Tehrani, 2011; Goff y Hartel, 2013).

Crioprotección

El efecto crioprotector de los estabilizantes en el helado se puede explicar por tres posibles mecanismos, descritos con más detalle en la publicación de Bahramparvar y Tehrani (2011) y que enseguida se resumen:

El primer mecanismo relaciona el aumento de la viscosidad con la reducción de la movilidad molecular. El aumento de la viscosidad debido a la adición de estabilizantes se correlaciona con el control del crecimiento de los cristales de hielo.

El segundo mecanismo de acción correlaciona la crioprotección de los estabilizantes con su capacidad para formar criogeles como resultado del choque térmico durante el almacenamiento.

El tercer mecanismo se enfoca a la incompatibilidad de los estabilizantes con las proteínas que provocan la separación de fases, que puede contribuir a retardar la recristalización. Algunos estabilizantes combinados con proteínas han demostrado ser más eficaces para controlar la recristalización del hielo.

El estado del conocimiento actual dice que es obvio el hecho de que los diferentes estabilizantes actúan con diferentes mecanismos de crioprotección para conseguir lo mismo: modificar las propiedades cinéticas de la fase descongelada del helado, en lugar de las propiedades termodinámicas asociadas con el agua.

Control de la fusión

Cuando el helado se presenta en forma de cono o en cualquier otra forma, la velocidad de fusión es lo más importante para el consumidor. El derretimiento lento, el drenaje lento del suero, la buena retención de la forma y el colapso más lento de la espuma son algunos de los parámetros de calidad deseados (Chang y Hartel, 2002).

El derretimiento del hielo se inicia en el exterior, y el agua del hielo derretido se difunde en la fase sérica viscosa no congelada; esta solución diluida fluye a través de los elementos estructurales (glóbulos de grasa desestabilizados, células de aire y cristales de hielo restantes) para gotear (Muse y Hartel, 2004). En el estudio de Muse y Hartel (2004), se descubrió que la desestabilización de la grasa, el tamaño de los cristales de hielo y el coeficiente de consistencia de la mezcla del helado afectan la velocidad de fusión del helado.

Las funciones de los emulsionantes y de los estabilizantes que controlan la fusión del helado son las siguientes: los emulsionantes promueven la desestabilización y la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa, que disminuyen en gran medida la velocidad de fusión del helado y promueven la retención de la forma. Los estabilizantes aumentan la resistencia al derretimiento, debido a su capacidad de retener agua y de mejorar la microviscosidad (Goff y Hartel, 2013; Muse y Hartel, 2004; Soukoulis *et al.*, 2008).

EL EXUDADO DEL MEZQUITE (*PROSOPIS* spp.) COMO POSIBLE ESTABILIZANTE DE HELADOS.

El exudado o goma del árbol de mezquite (*Prosopis* spp.) es un proteoglicano complejo altamente ramificado, que ha sido aprobado como coadyuvante en alimentos, bebidas y suplementos alimenticios por la Secretaría de Salud de México desde 2006 (Diario Oficial de la Federación, <https://www.dof.gob.mx>). Al igual que la goma arábiga, es altamente soluble en agua y forma estructuras globulares compactas. En solución acuosa, estas estructuras globulares proporcionan la capacidad de reducir la tensión superficial y actúan como estabilizantes y emulsionantes sin un aumento significativo de la viscosidad; además, tiene la misma identidad inmunoquímica (Goycoolea *et al.*, 1997). A continuación, se describen algunas propiedades fisicoquímicas y de estructura química, que informan sobre su potencial aplicación en la fabricación de helados.

Estructura química de la goma de mezquite

La estructura primaria del componente polisacárido del exudado de mezquite consiste de una cadena principal compuesta por D-galactosa y ácido glucurónico con ramificaciones de oligómeros de cantidad variable de L-arabinosa, y de pequeñas proporciones de D-manosa, D-glucosa y D-xylosa. Además, tiene un componente proteico que representa alrededor del 4% de su peso y compuestos fenólicos, por lo que la goma de mezquite se considera un proteoglicano de arabinogalactano, del mismo tipo que la goma arábiga (López-Franco *et al.*, 2004; 2008; 2012).

La goma de mezquite colectada en el estado de Sonora, de *Prosopis velutina*, al fraccionarse por cromatografía de interacción hidrofóbica, presentó tres componentes principales: arabinogalactanas (AG), arabinogalactanas proteicas (AGP) y glicoproteínas (GP), que representan 94.7, 3.6 y 1.6% del total de la molécula. Estas fracciones difieren en contenido de proteína, dimensiones macromoleculares y propiedades de superficie (López-Franco *et al.*, 2004).

Mediante estudios de dispersión de luz, se observó que la goma de mezquite (*P. velutina*) tiene un peso molecular de $386\ 000\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, un

radio de giro (R_G) de 50.47 nm y un radio hidrodinámico (R_H) de 9.48 nm, que la asemeja a una estructura de espiral polidispersa similar a la reportada para las AGP de goma arábica (López-Franco *et al.*, 2004; Qi *et al.*, 1991).

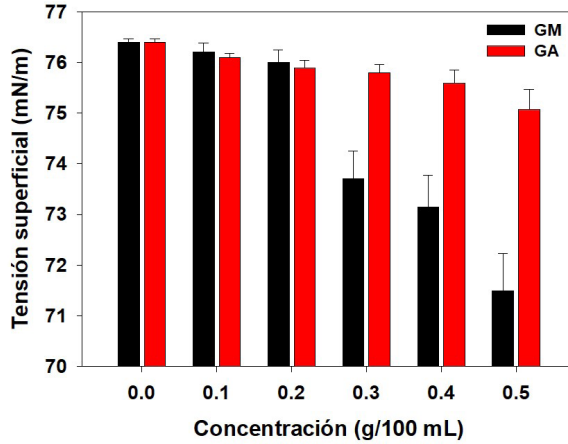
Entre las propiedades físico-químicas más importantes de la goma de mezquite se encuentran su alta solubilidad en agua y su baja viscosidad. La goma de mezquite es muy soluble en medios acuosos por encima del 50% (p/p) e insoluble en solventes orgánicos. Las soluciones acuosas varían de un color amarillo claro hasta un color café marrón. Estas diferencias en color dependen de la concentración y de la especie. El pH de las soluciones se encuentra en un rango de 4.5-5 (López-Franco *et al.*, 2012).

Efecto en el equilibrio de las interfaces agua/aire y agua/grasa

Al igual que la goma arábica, la goma de mezquite, por sus componentes de carbohidrato y proteína, es una molécula anfifílica que debe tener la capacidad de adsorción interfacial agua/aire y agua/grasa. La concentración de goma y el pH de la solución son los factores más importantes que influyen en esta propiedad. El efecto de la concentración en la tensión superficial de la interfase aire-agua fue medida por Encinas (2016) usando el método del anillo de Du Nouy. Encontró que la goma de mezquite reduce más la tensión superficial de las soluciones acuosas que la goma arábica a la misma concentración, en un rango de concentraciones entre 0.2 y 0.5% (figura 4), que generalmente se usa en las mezclas de helado (Goff y Hartel, 2013). Algunos estabilizantes producen gomosidad en concentraciones más bajas que otros, por lo que el desarrollo del producto requiere precaución al optimizar las concentraciones de estabilizante para la funcionalidad física (Goff y Hartel, 2013).

La goma de mezquite tiene la capacidad para formar y estabilizar emulsiones de aceite en agua con diferentes aceites de cítricos (Acedo-Carrillo *et al.*, 2006; Goycoolea *et al.*, 1997). Con grasa butírica fundida a 37°C, Encinas (2016) observó una mayor capacidad de la goma de mezquite para formar y estabilizar la emulsión a niveles de 0.2 y 0.4% (p/p), que la goma arábica (figura 5). Posteriormente, esto podría favorecer el proceso de coalescencia parcial o desestabilización de la grasa

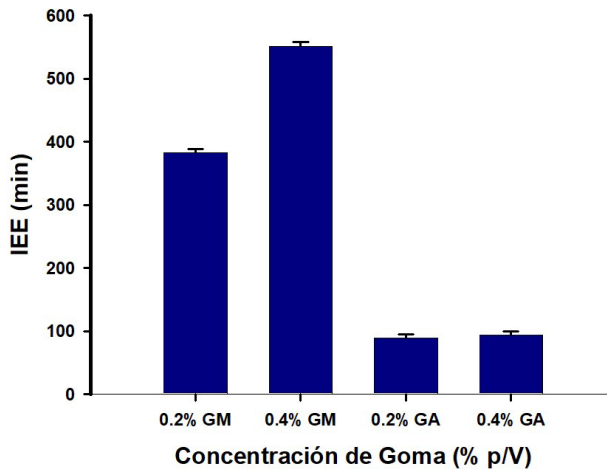
FIGURA 4



Tensión superficial de soluciones acuosas con goma de mezquite (GM) y goma arábica (GA).
Fuente:

antes del endurecimiento o durante la fusión del helado (Goff y Hartel, 2013). Pero aún es necesario llevar la investigación a experimentos de endurecimiento y de fusión del helado.

FIGURA 5

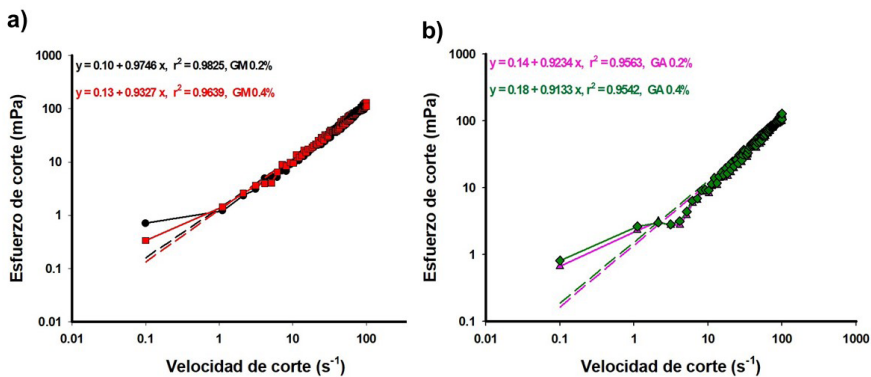


Índice de estabilidad de la emulsión grasa butírica en agua, como una función del tipo y concentración de goma. Goma de mezquite (GM), goma arábica (GA).
Fuente:

Efecto en el comportamiento de flujo

La goma de mezquite y la goma arábica en solución se comportan como fluidos newtonianos a cizallamiento constante, e incluso en concentraciones muy por encima de su concentración crítica, pero con índices de consistencia diferentes entre ellas (López-Franco *et al.*, 2012). El efecto de la concentración de estas dos gomas en soluciones acuosas, a dos niveles de concentración de estabilizantes utilizados en las mezclas para helados (0.2 y 0.4%), fue estudiado por Encinas (2016). El aumento de la concentración aumentó asimismo la pseudoplasticidad (disminuyó los valores de n a 0.93 y 0.97) e incrementó la naturaleza viscosa de la solución (aumentó los valores de K o índice de consistencia). La goma arábica afectó más estos parámetros de flujo que la goma de mezquite ($n = 0.92$ y 0.91) (figura 6). La obtención de las curvas de flujo con una mezcla de helado, así como el efecto de la temperatura del proceso de congelación, aún están en espera.

FIGURA 6



Ajuste de las curvas log de la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) versus log del esfuerzo de corte (τ) para obtener los parámetros de flujo de las soluciones de goma, como una función del tipo y concentración de goma. a) Goma de mezquite (GM); b) goma arábica (GA).

Fuente:

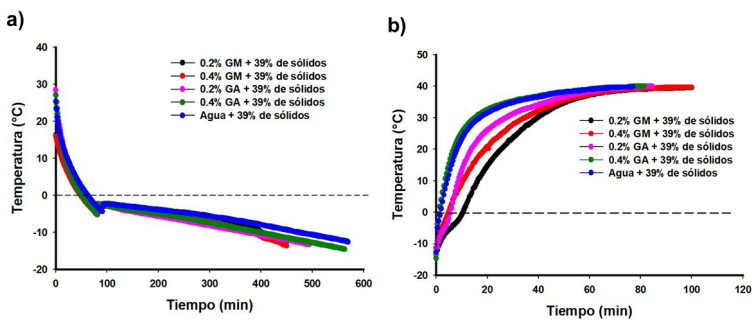
Efecto en la cinética de la congelación y la descongelación.

La congelación de un alimento pasa por tres fases: 1) enfriar hasta llegar a la zona de congelación; 2) enfriar en la zona de congelación y 3) enfriar

el producto congelado; mientras que, en la descongelación, el producto se calienta más rápidamente y los gradientes de temperatura interna son mucho más bajos que en la congelación. El conocimiento de las propiedades de congelación y descongelación de los alimentos es importante para estimar los requisitos de refrigeración de los sistemas de congelación, conservar la energía necesaria para la congelación, establecer un proceso confiable y conservar la calidad del producto (Raji *et al.*, 2017).

El efecto de la goma de mezquite en la cinética de la congelación y la descongelación de una mezcla para helados se ha investigado muy poco. Encinas (2016), en un congelador estático a -18°C , observó que la goma de mezquite y la goma arábiga en una mezcla láctea con 39% de sólidos (con los niveles de goma, 0.2 y 0.4%), alargaron el tiempo de subenfriamiento, esto es, prolongaron la formación de la fase sólida, excepto el 0.2% de goma de mezquite, que se comportó como un promotor de la nucleación (Wang *et al.*, 2015). La mezcla láctea con goma arábiga alcanzó la temperatura de -18°C en menor tiempo que los otros tratamientos (figura 7). Si la cantidad de las gomas no influyó mucho en la tendencia de la curva de congelación, las características de la goma pudieron afectar la velocidad de congelación.

FIGURA 7



Curvas de congelación (a) y de descongelación (b) de una mezcla láctea con 39% de sólidos, como una función del tipo y concentración de goma.

Goma de mezquite (GM); goma arábiga (GA).

Fuente:

Si la congelación ocurre con suficiente lentitud, el efecto de concentración por congelación se puede observar en el perfil de temperatura-tiempo,

observando el cambio de la pendiente de la zona casi plana de la curva, cuya desviación indica la depresión del punto de congelación (Goff y Hartel, 2013). El aumento de concentración de la goma de mezquite bajó más la zona plana (figura 7), lo cual indica que menos agua se congeló durante esta fase de enfriamiento, que posteriormente se congelará durante la tercera fase de enfriamiento, e incluso en el endurecimiento del helado, incrementando su dureza. La goma de mezquite disminuyó la velocidad de eliminación del calor latente y alargó la etapa de congelación.

La cinética de descongelación informa sobre la velocidad de fusión del helado. Encinas (2016), en condiciones de descongelación acelerada a 40°C, observó que con 0.4% de goma de mezquite la descongelación se retrasó medio minuto en comparación con el helado sin goma, y que, transcurridos diez minutos, la temperatura del centro térmico del helado con goma fue negativa (-0.9°C), mientras que en el helado sin goma la temperatura fue de 23°C (figura 7). La goma de mezquite disminuyó la velocidad de fusión del helado ~ 25% y la goma arábiga, aproximadamente 8%. Este efecto probablemente positivo de la goma de mezquite deberá estudiarse más para determinar su uso en formulaciones de mezclas de helados.

TENDENCIAS FUTURAS EN LA INDUSTRIA DE HELADOS LÁCTEOS

Aunque los científicos y los tecnólogos de alimentos han trabajado, los primeros, para mejorar la comprensión de la ciencia del helado, y los segundos, para mejorar la calidad funcional y nutricional de los helados, aún no se prevé cómo usar esa ciencia para controlar el proceso de fabricación, o para optimizar la calidad del producto y la eficiencia de la fabricación.

Uno de los aspectos más críticos de la calidad del helado durante su vida útil es el endurecimiento de los cristales de hielo, en particular en los almacenes donde las temperaturas fluctúan de manera regular. Aún es incierta la comprensión de exactamente cómo y por qué los estabilizantes de alto peso molecular inhiben la recristalización.

Dada la situación sanitaria actual, la calidad nutricional de los helados es otro tema importante de estudio. Se están diseñando helados promotores de la salud con aditivos específicos y naturales que

reemplacen azúcares y grasas, y con compuestos bioactivos, probióticos y sus mezclas.

La búsqueda de estrategias para la incorporación eficiente de nuevos estabilizantes, como la goma exudada de mezquite, y su impacto en la estructura, en las características sensoriales, en la estabilidad en el almacenamiento y en la biofuncionalidad, es muy probable que continúe en el futuro inmediato.

CONCLUSIONES

Desde una perspectiva práctica, la estructura tiene su mayor efecto sobre la textura y la estabilidad. Dado que éstas son dos de las mayores preocupaciones tanto de los fabricantes como de los consumidores, es de vital importancia comprender la estructura del helado y el papel de los diversos ingredientes en su creación y mantenimiento. Por ejemplo, sin un entendimiento de la formación de la fase no congelada, no se comprenderían los efectos de la incorporación de un nuevo estabilizante sobre la dureza. Sin una comprensión del fenómeno de desestabilización de la grasa, no se comprendería un cambio en el tipo de emulsionante o estabilizante anfílico, como la goma de mezquite, en cuanto a la estabilidad de la fusión. Sin una comprensión de la cristalización y la recristalización del hielo, no se comprendería el efecto de la concentración de un estabilizante sobre la suavidad del helado. Por lo tanto, es de vital importancia que los fabricantes, proveedores de ingredientes y proveedores de equipos comprendan los principios de la formación de la estructura en los helados.

Los resultados del estudio para prever la incorporación de la goma exudada del mezquite (*Prosopis* spp.) como estabilizante de helados lácteos indican que posee algunas características estabilizantes y emulsionantes, y un comportamiento reológico en solución acuosa, que pudieran contribuir bien en la formación de la estructura y en la estabilidad en el almacenamiento. Se debe seguir adquiriendo conocimientos sobre su impacto en la calidad de estos productos para potenciar su introducción como un aditivo alimentario.

REFERENCIAS

- ACEDO-CARRILLO, J.I., Rosas-Durazo, A., Herrera-Urbina, R., Rinaud, M., Goycoolea, F.M., Valdez, M.A. (2006). “Zeta potential and drop growth of oil in water emulsions stabilized with mesquite gum”, *Carbohydrate Polymers*, 65, 327-336.
- ADAPTA, S., Schmidt, K. A., Jeon, I. J., Herald, T. J., y Flores, R. A. (2000). “Mechanisms of ice crystallization and recrystallization in ice cream: a review”, *Food Reviews International*, 16, 259-271.
- AKBARI, M., Eskandari, M. H., Niakosari, M., y Bedeltavana. A. (2016). “The effect of inulin on the physicochemical properties and sensory attributes of low-fat ice cream”, *International Dairy Journal*, 57, 52-55.
- AMADOR, J., Hartel, R., y Rankin, S. (2017). “The effects of fat structures and ice cream mix viscosity on physical and sensory properties of ice cream”, *Journal of Food Science*, 82, 1851-1860.
- ANJO, F. A., Rocha Saraiva, B., Da Silva, J. B., Ribeiro, Y. C., Bruschi, M. L., Riegel-Vidotti, I .C., Fogagnoli Simas, F., y Matumoto-Pintro P. T. (2021). “Acacia mearnsii gum: a residue as an alternative gum Arabic for food stabilizer”, *Food Chemistry*, 344, 128640.
- BARAK, S., Mudgil, D., y Taneja, S. (2020). “Exudate gums: chemistry, properties and food applications. A review”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100, 2828-2835.
- BAHRAMPARVAR, M., y Tehrani, M. M. (2011). “Application and functions of stabilizers in ice cream”, *Food Reviews International*, 27, 389-407.
- BREJNHOLT, S.M. (2010). “Pectin”, en A. Imeson (ed.), *Food stabilisers, thickeners and gelling agents*. Oxford, Reino Unido: Wiley-Blackwell, 237-262.
- CHANG, Y., y Hartel, R. W. (2002). “Development of ice cells in a batch ice cream freezer”, *Journal of Food Engineering*, 55,71-78.
- COOK, K. L. K., y Hartel, R. W. (2010). “Mechanisms of ice crystallization in ice cream production”, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9, 213-222.
- DOOLEY, L., Lee, Y-S., y Meullenet, J.-F. (2010). “The application of check-all-that-apply (CATA) consumer profiling to preference

- mapping of vanilla ice cream and its comparison to classical external preference mapping”, *Food Quality and Preference*, 21, 394-401.
- Euromonitor International’s Report (2020). “Ice cream and frozen desserts in Mexico”. <https://www.euromonitor.com/ice-cream-and-frozen-desserts-in-mexico/report>.
- ENCINAS CÁRDENAS, A.G. (2016). “Utilización de la goma de mezquite (*Prosopis* spp.) como sustituto de la goma arábica (*Acacia* spp) en formulaciones de helados lácteos”, tesis de licenciatura, Universidad de Sonora.
- FDA (2019). “Title 21. Food and Drugs. Chapter I. Food and Drug Administration, Department of Health and Human Services (Continued). Subchapter B. Food for human consumption (continued). Part 170. Food additives. Subpart A. General Provisions”. U. S. Food and Drug Administration. <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?CFRPart=172>.
- FREIRE, D. O., Wu, B., y Hartel, R. W. (2020). “Effects of structural attributes on the rheological properties of ice cream and melted ice cream”, *Journal of Food Science*, 85, 3885-3898.
- GOFF, H. D. (1997). “Colloidal aspects of ice cream. A review”, *International Dairy Journal*, 7, 363-373.
- GOFF, H. D., Freslon, B., Sahagian, M. E., Hauber, T. D., Stone, A. P., y Stanley, D. W. (1995). “Structural development in ice cream-dynamic rheological measurements”, *Journal of Texture Studies*, 26, 517-536.
- GOFF, H. D., y Hartel, R. W. (2013). *Ice cream*. Nueva York: Springer.
- GOFF, H. D., y Hartel, R. W. (2004). “Ice cream and frozen desserts”, en Y. H. Hui, P. Cornillon, I. Guerrero Legaretta y M. H. Lim (eds.), *Handbook of frozen foods*. Nueva York: Marcel Dekker, Inc., 1-72.
- GOYCOOLEA, F. M., Calderón de la Barca, A. M., Balderrama, J. R., y Valenzuela, J. R. (1997). “Immunochemical and functional properties of the exudate gum from northwestern mexican mesquite (*Prosopis* spp.) in comparison with gum arabic”, *International Journal of Biological Macromolecules*, 21, 29-36.

- GRANGER, C., Leger, A., Barey, P., Langendorff, V., y Cansell, M. (2005). "Influence of formulation on the structural networks in ice cream", *International Dairy Journal*, 15, 255-262.
- GUO, E., Kazantsev, D., Mo, J., Bent, J., Van Dalen, G., Schuetz, P., Rockett, P., StJohn, D., y Lee, P.D. (2018). "Revealing the microstructural stability of a three-phase soft solid (ice cream) by 4D synchrotron X-ray tomography", *Journal of Food Engineering*, 237, 201-214.
- HARTEL, R. W., Rankin, S. A. y Brandley Jr. R. L. (2017). "A 100-year review: milestones in the development of frozen desserts", *Journal of Dairy Science*, 100, 10014-10025.
- HOEFLER, A. C. (2004). *Hydrocolloids. Practical guide for the food industry*. St. Paul MN: Eagan Press Handbook Series.
- HOMAYOUNI, A., Javadi, M., Fereshteh, A., Pourjafar, H., Jafarzadeh, M., y Barzegar, A. (2018). "Advanced methods in ice cream analysis: a review", *Food Analytical Methods*, 11, 3224-3234.
- JAVIDI, F., Razavi, S. M. A., Behrouzian, F., y Alghooneh, A. (2016). "The influence of basil seed gum, guar gum and their blend on the rheological, physical and sensory properties of low-fat ice cream", *Food Hydrocolloids*, 52, 625-633.
- KALEDA, A., Tsanev, R., Klesment, T., Vilu, R., y Laos, K. (2018). "Ice cream structure modification by ice-binding proteins", *Food Chemistry*, 246, 164-171.
- KAMINSKA-DWORZNIKA, A., Janczewska-Dupczyk, A., Kot, A., Laba, S., y Samborska, K. (2020). "The impact of ι - and κ -carrageenan addition on freezing process and ice crystals structure of strawberry sorbet frozen by various methods", *Journal of Food Science*, 85, 50-56.
- KAWAHARA, H. (2013). "Characterization of functions of biological materials having controlling-ability against ice crystal growth", en Sukarno Ferreira (ed.), *Advanced topics on crystal growth*. Oxford, Reino Unido: IntechOpen, 119-142.
- LI, X., Fang, Y., Al-Assaf, S., Phillips, G. O., Nishinari, K., y Zhang, H., (2009). "Rheological study of gum arabic solutions: interpretation based on molecular self-association", *Food Hydrocolloids*, 23, 2394-2402.

- LÓPEZ-FRANCO, Y. L., Calderón de la Barca, A. M., Valdez, M. A., Peter, M. G., Rinaudo, M., Chambat, G., y Goycoolea, F. M. (2008). "Structural characterization of mesquite (*Prosopis velutina*) gum and its fractions", *Macromolecular Bioscience*, 8(8), 749-757.
- LÓPEZ-FRANCO, Y. L., Córdova-Moreno, R. E., Goycoolea, F. M., Valdez, M. A., Juárez-Onofre, J., y Lizardi-Mendoza, J. (2012). "Classification and physicochemical characterization of mesquite gum (*Prosopis* spp.)", *Food Hydrocolloids*, 26, 159-166.
- LÓPEZ-FRANCO, Y. L., Valdez, M. A., Hernández, J., Calderón de la Barca, A. M., Rinaudo, M., y Goycoolea, F. M. (2004). "Macromolecular dimensions and mechanical properties of monolayer films of Sonorean mesquite gum", *Macromolecular Bioscience*, 4, 865-874.
- Market Analysis Report (2019). "Hydrocolloids market size, share & trends analysis report by product (gelatin, xanthan gum, carrageenan, alginates, pectin, guar gum, carboxy methyl cellulose), by function, by application, and segment forecasts, 2019-2025". <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/hydrocolloids-market>.
- MUSE, M. R., y Hartel, R. W. (2004). "Ice cream structural elements that affect melting rate and hardness", *Journal of Dairy Science*, 87, 1-10.
- QI, W., Fong, C., y Lamport, D. T. (1991). "Gum arabic glycoprotein is a twisted hairy rope: a new model based on O-galactosylhydroxyproline as the polysaccharide attachment site", *Plant Physiology*, 96, 848-855.
- RAJI, A. O., Akinoso, R., Ibanga, U., y Raji M. O. (2017). "Freezing and thawing characteristics of some selected Nigerian soups", *Journal of Food Process Engineering*, 40, e12354.
- SCHMIDT, K. A. (2004). "Dairy: ice cream", en *Food processing: principles and applications*. Iowa: Blackwell Publishing Professional, 287-296.
- SEISUN, D. (2010). "Introduction", en A. Imeson (ed.), *Food stabilisers, thickeners and gelling agents*. Oxford, Reino Unido: Wiley-Blackwell, 1-10.

- SOEJAN, R. P., y Hartel, R. W. (2004). "Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream", *International Dairy Journal*, 14, 255-262.
- SOUKOULIS, C., Chandrinou, I., y Tzia, C. (2008). "Study of the functionality of selected hydrocolloids and their blends with kappa-carrageenan on storage quality of vanilla ice cream", *LWT*, 41, 1816-1827.
- SOUKOULIS, C., Fisk, I. D., y Bohn, T. (2014). "Ice cream as a vehicle for incorporating health-promoting ingredients: conceptualization and overview of quality and storage stability", *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13, 627-655.
- SUNG, K. K., y Goff, H. D. (2010). "Effect of solid fat content on structure in ice creams containing palm kernel oil and high-oleic sunflower oil", *Journal of Food Science*, 75, C274-C279.
- SYED, Q.A., Anwar, S., Shukat, R., y Zahoor T. (2018). "Effect of different ingredients on texture of ice cream", *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 8(6), 422-435.
- TABILO-MUNIZAGA, G., y Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). "Rheology for the food industry", *Journal of Food Engineering*, 67, 147-156.
- VARELA, P., Pintor, A., y Fiszman, S. (2014). "How hydrocolloids affect the temporal oral perception of ice cream", *Food Hydrocolloids*, 36, 2020-228.
- WANG, X., Wang, S., Xu, Q., y Mi, J. (2015). "Thermodynamics of ice nucleation in liquid water", *The Journal of Physical Chemistry B*, 119-1660-1668.
- WANG, L., y Weller, C. L. (2012). "Thermophysical properties of frozen foods", en Da-Wen Sun (ed.), *Handbook of frozen food processing and packaging*. Boca Raton, Florida: CRC Press / Taylor & Francis Group, 98-126.
- WARREN, M. M., y Hartel, R. W. (2018). "Effects of emulsifier, overrun and dasher speed on ice cream microstructure and melting properties", *Journal of Food Science*, 83, 639-647.
- WARREN, M. M., y Hartel, R. W. (2014). "Structural, compositional, and sensorial properties of United States commercial ice cream products", *Journal of Food Science*, 79, E2005-E2013.

- WIELINGA, W. (2010). "Seed gums", en A. Imeson (ed.), *Food stabilizers, thickeners and gelling agents*. Oxford, Reino Unido: Wiley-Blackwell, 275-291.
- WILDMOSER, H., Scheiwiller, J., y Windhab, E. J. (2004). "Impact of disperse microstructure on rheology and quality aspects of ice cream", *LWT*, 37, 881-891.
- YOUSEFI, M., y Jafari, S. M. (2019). "Recent advances in application of different hydrocolloids in dairy products to improve their techno-functional properties", *Trends in Food Science & Technology*, 88, 468-483.

CAPÍTULO 18
PLANTAS DE ZONAS ÁRIDAS
FUENTE DE ADITIVOS PARA LA CONSERVACIÓN
DE LA CARNE Y PRODUCTOS CÁRNICOS

REY DAVID VARGAS-SÁNCHEZ¹

ARMIDA SÁNCHEZ-ESCALANTE²

BRISA DEL MAR TORRES-MARTÍNEZ³

MARÍA DE LOS ÁNGELES DE LA ROSA-ALCARAZ⁴

GASTÓN RAMÓN TORRESCANO-URRUTIA⁵

RESUMEN

La carne y los productos cárnicos son una fuente importante de nutrientes, como lípidos y proteínas. Estos componentes, bajo ciertas condiciones (extrínsecas e intrínsecas), son susceptibles al proceso de oxidación, así como al crecimiento de bacterias deteriorativas y patógenas, los cuales son factores asociados a la pérdida de calidad y a la disminución de aceptabilidad por parte del consumidor. En consecuencia, la incorporación de aditivos alimentarios (antioxidantes y antimicrobianos sintéticos) tiene como fin prevenir las reacciones de oxidación y reducir el crecimiento de microorganismos. Sin embargo, el uso no controlado de estos aditivos se ha relacionado con efectos adversos en la salud humana, por lo que en

¹ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Animal (CTAOA), Laboratorio de Investigación en Carne y Productos Cárnicos (LICPC). Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas 46, C.P. 83304, Hermosillo, Sonora, México.

² *Id.*

³ *Id.*

⁴ Universidad Estatal de Sonora (UES), Blvd. Manlio Fabio Beltrones 810, Col. Bugambilias, CP 85875 Navojoa, Sonora, México.

⁵ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Animal (CTAOA), Laboratorio de Investigación en Carne y Productos Cárnicos (LICPC). Autor de correspondencia: gtorrescano@ciad.mx.

años recientes existe la necesidad de obtener aditivos a partir de fuentes naturales. En este capítulo se describen trabajos de investigación sobre el uso de antioxidantes y antimicrobianos de plantas de zonas áridas, como aditivos para la industria cárnica. En diversos estudios se demostró que las harinas y los extractos obtenidos a partir de plantas de zonas áridas son una fuente importante de compuestos bioactivos. Adicionalmente, la incorporación de éstos en concentraciones adecuadas a la carne y los productos cárnicos incrementa la calidad fisicoquímica, microbiológica y sensorial durante su almacenamiento.

PALABRAS CLAVE: aditivo alimentario, antimicrobiano, antioxidante, calidad de la carne, compuestos bioactivos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, México es considerado un importante productor de carne de cerdo, res y pollo en América Latina. La producción de estas especies fue alrededor de 1.4, 2.1 y 3.7 miles de toneladas (Mt) en 2020, reportándose un consumo doméstico de 2.1, 1.9 y 4.5 Mt para el mismo año, respectivamente. Respecto a las exportaciones, éstas fueron de 0.35, 0.62 y 0.006 Mt de carne de cerdo, res y pollo, respectivamente; y se importaron 0.91, 0.14 y 0.83 Mt de carne de estas especies (USDA, 2021)

En relación con la carne procesada, el Consejo Mexicano de la Carne reportó que en México la producción de productos cárnicos fue de aproximadamente 1.0 lt en 2019, mientras que el consumo superó en 1.0% a esta cifra; la exportación de estos productos fue de 5 275 ton, aunque fue necesario importar 20 015 ton. Adicionalmente, desagregando por tipo de proteína, en el 51% de los productos elaborados se utilizó carne que fue exclusivamente destinada para la formulación de jamones, pechugas y salchichas; el 22% de los productos elaborados fue representado por jamones procedentes de carnes rojas (York, ahumado, Virginia, horneado, americano y cocido), y el 27% de la producción representó a otras carnes frías, como tocino, chorizo y longaniza, mortadela, queso de puerco y salchichas (Comecarne, 2019).

La carne y los productos cárnicos son considerados una fuente importante de nutrientes, como proteínas y aminoácidos, lípidos y ácidos grasos, vitaminas y minerales, y en menor proporción carbohidratos, los cuales son indispensables para la dieta humana; aunque también se caracterizan por poseer un alto contenido de agua (Bohrer, 2017). Sin embargo, se sabe que los procesos de oxidación de estos macronutrientes están estrechamente asociados a la pérdida de los atributos fisicoquímicos y organolépticos de calidad (color, olor, sabor, textura, capacidad de retención de agua, estabilidad oxidativa, por mencionar algunas). La presencia de estos macronutrientes en la carne y los productos cárnicos los convierten en un medio ideal para el desarrollo de microorganismos patógenos o deteriorativos. En consecuencia, la industria cárnica considera a estas dos condiciones los principales factores asociados al deterioro de la calidad de la carne y sus productos, debido a que ambos reducen la vida útil y la seguridad en los alimentos (Efenberger-Szmechtyk *et al.*, 2021; Faustmant *et al.*, 2010; Ramírez-Rojo *et al.*, 2018).

Por lo anterior, la industria cárnica, en concordancia con las normativas nacionales, durante el procesamiento de la carne y los productos cárnicos, emplea aditivos (por ejemplo, butilhidroxianisol, butilhidroxitolueno, terbutilhidroquinona, galato de propilo, ciertos ácidos orgánicos, nitratos y nitritos, entre otros), capaces de controlar eficazmente las reacciones de oxidación e inhibir o reducir el crecimiento de microorganismos (Secretaría de Gobernación, 2002). Sin embargo, se ha demostrado que el uso no controlado de estos aditivos puede provocar efectos adversos en la salud del consumidor. Por esta razón, ha aumentado la preferencia del consumidor por adquirir carne y productos cárnicos saludables y seguros, principalmente por los elaborados con aditivos de origen natural (Teixeira y Rodrigues, 2020).

En los últimos años, la obtención de harinas y extractos a partir de fuentes naturales, como hongos silvestres y comestibles, productos apícolas, residuos agroindustriales, y diversas partes anatómicas de plantas, es considerada una estrategia prometedora para el desarrollo u obtención de nuevos aditivos antioxidantes y antimicrobianos para la industria cárnica (Faustmant *et al.*, 2010; Pateiro *et al.*, 2021; Ramírez-Rojo *et al.*, 2018). Sin embargo, el uso de plantas de zonas áridas como fuente de compuestos antioxidantes y antimicrobianos para carne y productos cárnicos no ha sido extensamente estudiado. Basado en lo anterior, el presente capítulo tiene como objetivo resumir las investigaciones existentes sobre la composición química y las propiedades bioactivas (actividad antioxidante y antimicrobiana) de plantas de zonas áridas, así como su posible uso como aditivos para la conservación de la carne y productos cárnicos.

COMPUESTOS BIOACTIVOS DE LAS PLANTAS DE ZONAS ÁRIDAS

Los compuestos bioactivos de las plantas pueden definirse como aquellos “metabolitos vegetales secundarios que provocan efectos farmacológicos o toxicológicos en el hombre y los animales”. No obstante, los nutrientes de las plantas (por ejemplo, vitaminas y minerales) no se incluyen en este término de compuesto bioactivo, aunque al ingerirse en dosis elevadas provoquen efectos farmacológicos o toxicológicos tanto en el hombre como en animales de diversas especies (Bandanarayake, 2002; Bernhoft *et al.*, 2010).

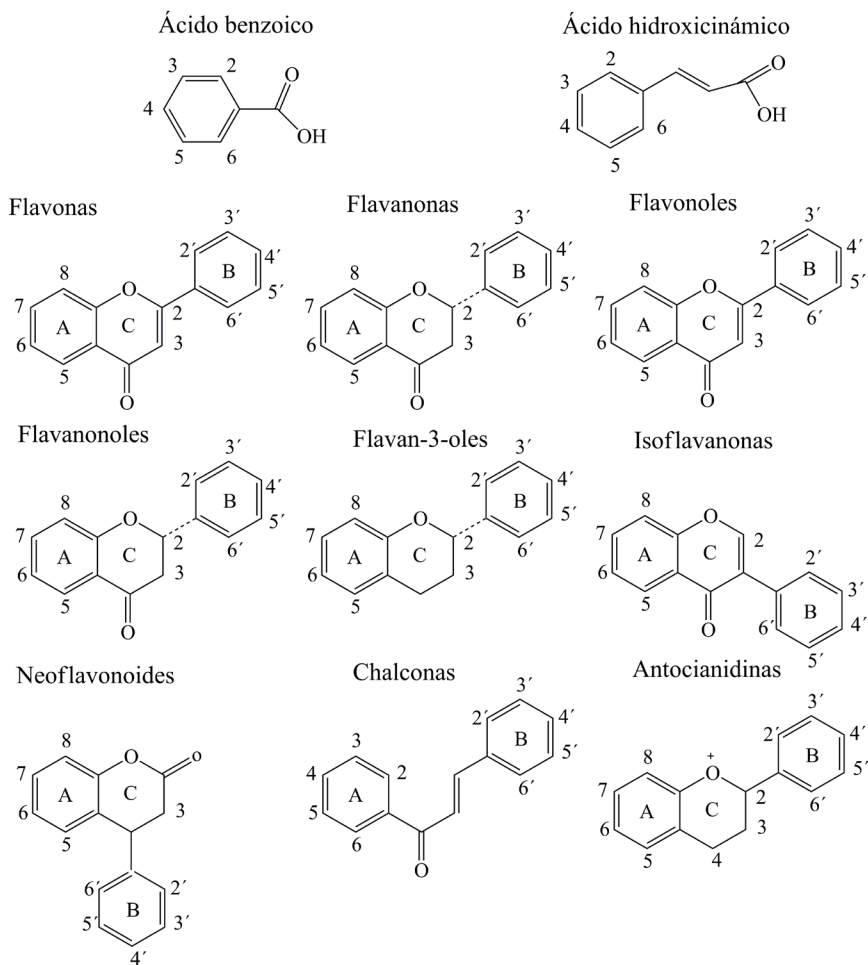
Los metabolitos secundarios, de acuerdo con sus características bioquímicas, pueden agruparse como nitrogenados (alcaloides, aminas, aminoácidos no proteicos, cianógenos, y glucosinolatos), así como no nitrogenados, en los que se incluye a los terpenoides y fenilpropanoides. Sin embargo, dada la diversidad en la conformación espacial dentro de cada grupo de metabolitos, éstos pueden clasificarse en cuatro clases principales, es decir, alcaloides, glicósidos, terpenos y compuestos fenólicos (Azmir *et al.*, 2013; Bandanarayake, 2002). Mientras que una forma simplificada para clasificar a los principales metabolitos bioactivos se basa en la vía biosintética, la cual describe a los alcaloides (vía ácido shikímico), terpenos (vía ácido mevalónico) y compuestos fenólicos (vía ácido malónico y shikímico) como las tres importantes categorías (Azmir *et al.*, 2013). En la última década, los compuestos fenólicos han recibido principal atención, dadas sus propiedades bioactivas (Azmir *et al.*, 2013; Bandanarayake, 2002; Pateiro *et al.*, 2021).

Clasificación de los compuestos fenólicos

Los ácidos fenólicos y los flavonoides son dos de los principales grupos en los que pueden dividirse los compuestos fenólicos (figura 1).

Los ácidos fenólicos se clasifican en dos grupos, hidroxibenzoicos y hidroxicinámicos. En el primer grupo se incluyen compuestos que tienen un grupo carboxílico ($-\text{COOH}$) y presentan uno o más grupos hidroxilos ($-\text{OH}$) en el anillo aromático. Los ácidos *p*-hidroxibenzoico (C_4), gálico (C_3 , C_4 , y C_5), y protocatecuico (C_3 y C_4) son ejemplos de compuestos pertenecientes a este grupo. Además, los compuestos del segundo grupo se caracterizan por la presencia de un grupo ($-\text{CH} = \text{CH}-\text{COOH}$) en sustitución del $-\text{COOH}$. Los ácidos cafeico (C_3 y C_4), *p*-cumárico (C_4) y ferúlico ($\text{C}_3(\text{OCH}_3)$ y C_4) son ejemplos de ácidos hidroxicinámicos. Mientras que los flavonoides estructuralmente están compuestos por dos anillos de fenilo (A y B) y un tercer anillo heterocíclico oxigenado (C), que forma una estructura de 15 carbonos ($\text{C}_6-\text{C}_3-\text{C}_6$). Con base en las características estructurales, los flavonoides pueden clasificarse como flavonas, flavanonas, flavonoles, flavanonoles, flavan-3-oles, isoflavonas neoflavonoides, chalconas y antocianidinas (Papuc *et al.*, 2017).

FIGURA 1



Estructura general de los compuestos fenólicos (ácidos fenólicos y flavonoides).

Fuente:

Las flavonas se caracterizan por poseer grupos $-OH$ localizados en el anillo A; pueden o no contener $-OH$ en el anillo B; tienen doble ligadura en los carbonos C_2-C_3 del anillo C; no contienen grupos $-OH$ en el C_3 , y poseen un grupo carbonilo ($C=O$) en C_4 . La apigenina (C_5 , C_7 , y C_4'), cri-sina (C_5 y C_7), luteolina (C_5 , C_7 , C_3' , y C_4') y baicaléina (C_5 , C_6 , y C_7) son ejemplos de este grupo de compuestos. Las flavanonas se caracterizan

por poseer grupos -OH en los anillos A y B; tienen una ligadura simple en los carbonos $\text{C}_2\text{-C}_3$ del anillo C; no contienen grupos -OH en el C_3 , y poseen un C=C en C_4 . La hesperetina (C_5 y C_7) y naringenina (C_5 , C_7 y C_4') son ejemplos de este grupo de compuestos. Aunque la hesperetina, presenta un grupo -OCH_3 en C_4 .

Los flavonoles tienen grupos -OH en el anillo A, pueden o no contener -OH en el anillo B (aunque la mayoría los contiene), tienen doble ligadura en los carbonos $\text{C}_2\text{-C}_3$ del anillo C, contienen grupos -OH en el C_3 , y poseen un C=O en C_4 . Como ejemplo de este grupo se puede mencionar a la fisetina (C_3 , C_7 , C_3' , y C_4'), galangina (C_3 , C_5 , y C_7), kempferol (C_3 , C_5 , C_7 , y C_4'), miricetina (C_3 , C_5 , C_7 , C_3 , C_4 , y C_5'), morina (C_3 , C_5 , C_7 , C_2' y C_4') y quercetina (C_3 , C_5 , C_7 , C_4' y C_5'). Mientras que los flavanonoles se caracterizan por poseer grupos -OH en los anillos A y B, tienen una ligadura simple en los carbonos $\text{C}_2\text{-C}_3$ del anillo C, contienen grupos -OH en el C_3 , y poseen un C=O en C_4 . La taxifolina (C_3 , C_5 , C_7 , C_3' , y C_4') y fustina (C_3 , C_7 , C_3' , y C_4') son ejemplos de este grupo de compuestos.

Por otra parte, los flavan-3-oles poseen grupos -OH localizados en los anillos A y B, tienen ligadura simple en los carbonos $\text{C}_2\text{-C}_3$ del anillo C, contienen grupos -OH en el C_3 en posición α o β , puede estar o no esterificado en C_3 con ácido gálico, y no poseen un C=O en C_4 . Algunos ejemplos de monómeros de este grupo de compuestos son (+)-catequina ($\text{C}_{2(\beta)}$, C_5 , C_7 , C_3' , y C_4'), (-)-epicatequina ($\text{C}_{2(\alpha)}$, C_5 , C_7 , C_3' , y C_4'), (-)-epigallocatequina ($\text{C}_{2(\alpha)}$, C_5 , C_7 , C_3' , C_4' , y C_5'), (-)-epicatequina-3-galato ($\text{C}_{2(\alpha\text{-O-galato})}$, C_5 , C_7 , C_3' , y C_4') y (-)-epigallocatequina-3-galato ($\text{C}_{2(\alpha\text{-O-galato})}$, C_5 , C_7 , C_3' , C_4' , y C_5'). Adicionalmente, las proantocianidinas o taninos condensados constituyen la forma polimérica de este grupo de compuestos, y resultan de la condensación oxidativa de las unidades monoméricas (flavan-3-oles) entre C_4 y C_6 o C_8 .

En el caso de las isoflavonas, estructuralmente la posición del anillo B se encuentra unido a C_3 del anillo C. Puede o no contener grupos -OH en el anillo A, contiene -OH en el anillo B, puede o no estar glicosilado (OGly) en C_7 , tienen ligadura doble en los carbonos $\text{C}_2\text{-C}_3$ del anillo C, poseen un C=O en C_4 . Como ejemplo, podemos mencionar a la genisteína (C_5 , C_7 , y C_4'), genistina (C_5 , $\text{C}_{7(\text{OGly})}$, y C_4'), daidzeína (C_7 y C_4') y daidzin ($\text{C}_{7(\text{OGly})}$ y C_4'). Además, los neoflavonoides (4-fenil-cumarinas)

estructuralmente se diferencian de las isoflavonas por la posición del anillo B en C₄, y la posición de la cetona (C=O) en C₂. El ejemplo más común es la dalbergina, la cual posee grupos –OH en posición C₅ y C₇. También, las chalconas difieren estructuralmente de los grupos de flavonoides mencionados antes, debido a que los anillos A y B están unidos por una cadena lineal en sustitución del anillo heterocíclico C. La isoliquiritegina (C₂, C₄, y C_{4'}) es un ejemplo de este grupo de compuestos, mientras que las antocianidinas difieren estructuralmente de los otros grupos de flavonoides debido a la presencia de un catión pirulina como anillo C y un grupo –OH en posición C₃. La cianidina (C₃, C₅, C₇, C_{3'}, y C_{4'}) y la cianina (C₃(OGly), C₅(OGly), C₇, C_{3'}, y C_{4'}) son ejemplos de compuestos pertenecientes a este grupo.

Recuperación de compuestos fenólicos

En las plantas, los compuestos fenólicos se obtienen para su posterior uso mediante la elaboración de harinas del material vegetal de interés, o mediante la recuperación de estos compuestos por obtención de extractos (Pateiro *et al.*, 2021). En la elaboración de harinas, el material vegetal comúnmente es colectado y sometido a un proceso de desinfección, separación de partes anatómicas (raíz, hoja, tallo, corteza, ramas, entre otras), trituración, secado, pulverización y almacenamiento del material (Pateiro *et al.*, 2021; Ramírez-Rojo *et al.*, 2019a; Romero *et al.*, 2020; Ruiz-Bustos *et al.*, 2009). En las harinas elaboradas a partir de plantas, la biodisponibilidad y propiedades de los compuestos bioactivos dependerá de la matriz y de las interacciones químicas entre los fitoquímicos y biomoléculas, de estas últimas, como carbohidratos, lípidos y proteínas (Quirós-Sauceda *et al.*, 2014).

Al obtener extractos a partir de plantas, de igual manera, el material vegetal se desinfecta, separa anatómicamente, tritura, seca, pulveriza y almacena para su posterior uso (Palmeri *et al.*, 2018; Pateiro *et al.*, 2021; Ramírez-Rojo *et al.*, 2019a; Romero *et al.*, 2020). Posteriormente, los compuestos bioactivos presentes en el polvo se extraen mediante el uso de disolventes de diversa polaridad (agua, etanol, metanol, acetona, hexano, entre otros), así como con el uso de métodos convencionales (extracción

asistida por maceración, hidrodestilación y Soxhlet) y no convencionales de extracción (extracción asistida por ultrasonido, enzimas, microondas, entre otros). Además, dependiendo del método de extracción empleado, el disolvente puede ser concentrado y secado para incrementar la estabilidad del extracto (Azmir *et al.*, 2013; Núñez-Gastélum *et al.*, 2018). Las condiciones de extracción son de suma importancia por sus efectos sobre la liberación de ciertos tipos de compuestos de la matriz al medio, facilitando su posterior recuperación e identificación, además de incrementar la bioactividad que presentarán los extractos obtenidos.

Identificación de compuestos fenólicos

En relación con plantas de zonas áridas, como el pitayo dulce (*Stenocereus thurberi*), nopal (*Opuntia ficus-indica*), mezquite (*Prosopis velutina*), maguey (*Agave angustifolia*), guereque (*Ibervillea sonora*), palmera datilera (*Phoenix dactylifera* L.), cosahui (*Krameria erecta*), toji (*Struthanthus palmeri*), toji de mezquite (*Phoradendron californicum*), chapacolor (*Stegnosperma halimifolium*) y sen (*Senna covessi*), se ha reportado que sus frutos, hojas y raíz, así como otras partes anatómicas, son una importante fuente de compuestos bioactivos, incluyendo a los compuestos fenólicos, como los ácidos fenólicos y flavonoides (Castro-Enríquez *et al.*, 2020; Jiménez-Estrada *et al.*, 2013; López-Romero *et al.*, 2018; Núñez-Gastélum *et al.*, 2018; Ramírez-Rojo *et al.*, 2019a; Ramírez-Rojo *et al.*, 2019b; Romero *et al.*, 2020).

Por ejemplo, en el estudio realizado por Sharifi-Rad *et al.* (2021) se identificó mediante cromatografía (LC-ESI-QTOF-MS/MS) la presencia de compuestos fenólicos en el extracto etanólico (85%) de hojas de *Prosopis*. Los ácidos fenólicos identificados fueron 2-hidroxibenzoico, 2,3-dihidroxibenzoico, 4-hidroxibenzoico 4-O-glucósido, cafeico, 3-O-glucorónido del ácido cafeico, 3-O-glucorónido del ácido ferúlico, *p*-cumárico, 1,5-dicafeoilquinico y sinápico. Mientras que los flavonoides identificados en este extracto fueron miricetina 3-O-galactósido, miricetina 3-O-ramnósido, (+)-catequina, (+)-catequina 3-O-galato, apigenina 6,8-di-C-glucósido, apigenina 6-C-glucósido, 6-hidroxiluteolina 7-O-ramnósido, hesperidina, neoeriocitrina, 3-O-glucorónido

de hesperetina, quercetina 3-O-(6''-malonil-glucósido), miricetina 3-O-rutinósido, kaempferol 3-O-(2''-ramnosil-galactósido), 7-O-ramnósido y kaempferol 3,7-O-diglucósido, entre otros.

En otro estudio, realizado por González-Montemayor *et al.* (2021), se identificó mediante cromatografía (RP-HPLC-ESI-MS) la presencia de compuestos fenólicos en extractos metanólicos de harina vaina de mezquite (*Prosopis glandulosa*). Los ácidos fenólicos identificados fueron el cafeico 4-O-glucósido, 3-*p*-cumaroilquínico y avenantramida 2f. Mientras que los flavonoides identificados fueron la apigenina 6,8-di-C-glucósido (vicenina II), crisoeriol 7-O-apiosil-glucósido apigenina-6-C, isoscaftósido e isoramnetina 3-O-glucósido 7-O-ramnósido. Además, Castro-Enríquez *et al.* (2020) identificaron mediante cromatografía (UPLC-DAD-MS) la presencia de ácidos fenólicos tales como cafeico, cafeoilquínico, ferúlico, gálico y *p*-cumárico en extractos de pitayo dulce; así como la presencia de flavonoides como la catequina, rutina, isoramnetina y quercetina.

Adicionalmente, García-Andrade *et al.* (2013) demostraron mediante cromatografía (HPLC, cromatografía líquida de alta resolución por sus siglas en inglés) la presencia de ácidos fenólicos, incluyendo al ácido gálico y *p*-cumárico en el extracto acetónico de hoja de mezquite (*Prosopis laevigata*), así como la presencia flavonoides galocatequina, epicatequina-nagalato, rutina, morina y naringenina.

Para la industria farmacéutica y de los alimentos es importante identificar los compuestos fenólicos presentes en harinas y extractos obtenidos a partir de plantas, debido a la extensa correlación entre estos componentes con sus propiedades bioactivas.

PROPIEDADES BIOACTIVAS DE LAS PLANTAS DE ZONAS ÁRIDAS

El uso medicinal y como alimento de plantas se ha aprovechado desde tiempos inmemorables, cuyo conocimiento tradicional se ha transmitido a lo largo de generaciones (Adamczak *et al.*, 2020). Por esta razón, el estudio de las plantas ha recibido mucho interés por parte de investigadores en productos farmacéuticos, debido a que a partir de éstas se han aislado compuestos biológicamente activos capaces de actuar como agentes antivirales, antiproliferativos, inmunomoduladores y

antiinflamatorios, por mencionar algunas (Azmir *et al.*, 2013; Adamczak *et al.*, 2020; Vidal-Gutiérrez *et al.*, 2020). Mientras que los investigadores en productos alimenticios han centrado su atención en el potencial antimicrobiano y antioxidante de las plantas (Efenberger-Szmechtyk *et al.*, 2021; Ramírez-Rojo *et al.*, 2018).

Actividad antimicrobiana

La actividad antimicrobiana de plantas puede determinarse mediante métodos basados en diferentes principios. Por ello, los resultados obtenidos pueden verse influidos por el solvente y método de extracción de los compuestos de prueba, microorganismo seleccionado, así como por el método seleccionado para la determinación cuantitativa (método de dilución), para la determinación del crecimiento o inhibición (método de dilución en caldo), o para indicar la presencia o ausencia (métodos colorimétricos, p.ej. resazurina) (Klančnik *et al.*, 2010).

Saleh y Abu-Dieyh (2021) estudiaron el efecto antimicrobiano del extracto acuoso de hojas de mezquite (*Prosopis juliflora*). Los resultados de esta investigación demostraron que este extracto presentó actividad antimicrobiana (*Proteus mirabilis* > *Staphylococcus aureus* > *Bacillus subtilis* > *Escherichia coli*). Además, Malathi y Murugesan (2021) obtuvieron extractos acuosos de *Opuntia ficus-indica*, y reportaron la actividad de este extracto contra *S. aureus* resistente a meticilina, lo cual se asoció a la presencia de alcaloides, carbohidratos, terpenoides, taninos, fenoles y flavonoides en el extracto. En tanto, El Mannoubi (2021) investigó el efecto de diversos solventes (acetona metanol y etanol, a la misma concentración (80%), sobre la actividad antimicrobiana de extractos de piel y pulpa de nopal (*O. ficus-indica*). En este estudio, los extractos etanólicos obtenidos de piel presentaron el mayor efecto inhibitorio frente a bacterias Gram-positivas (*Enterococcus faecium*), mientras que los extractos acetónicos presentaron el mayor efecto frente a bacterias Gram-negativas (*E. coli* y *Salmonella typhimurium*).

López-Romero *et al.* (2018) obtuvieron extractos etanólicos a partir de hojas de magüey (*Agave angustifolia*), y demostraron la efectividad del extracto contra *Staphylococcus epidermis* y *E. coli*. Además, Palmeri *et al.*

(2018) demostraron el efecto antimicrobiano del extracto acuoso de la pulpa del fruto rojo de nopal (*O. ficus-indica*) en el siguiente orden de inhibición, *Bacillus cereus* > *Pseudomonas fluorescens* > *Escherichia coli* > *Listeria innocua* > *Bacillus subtilis* > *Salmonella enterica* > *Staphylococcus aureus*.

También, Hernández-Hernández *et al.* (2017) reportaron el poder antioxidante del aceite esencial de hojas obtenido del nopal (*O. ficus-indica*) frente a *Micrococcus luteus*, *Brochothrix thermosphacta*, *Lactobacillus plantarum*, *Pseudomonas fragi* y *Salmonella infantis*. Mientras que, Ruiz-Bustos *et al.* (2009) indicaron el poder antimicrobiano de las hojas de sangregado (*Jatropha cuneata*) y de las partes áreas del guereque (*Iberivillea sonora*), frente a *S. aureus* y *E. coli*.

Actividad antioxidante

La actividad antioxidante en plantas puede ser determinada mediante diferentes métodos, los cuales pueden clasificarse según el mecanismo de acción por el que los compuestos bioactivos o el antioxidante detienen el proceso de ruptura de cadena, y éstos se pueden dividir en dos grupos; i) transferencia de átomo de hidrógeno (HAT, por sus siglas en inglés) y ii) transferencia de un solo electrón (SET, por sus siglas en inglés). Respecto a los métodos que trabajan con el mecanismo HAT, se encuentran los de eliminación de radicales DPPH[•]. Mientras que, bajo el mecanismo SET, se encuentran el método de eliminación de radicales ABTS^{•+}, así como los ensayos de reducción férrica y cúprica (Chaves *et al.*, 2020), por mencionar algunos.

En el estudio realizado por Sharifi-Rad *et al.* (2021) se obtuvo un extracto etanólico (85%) a partir de hojas de mezquite (*Prosopis leavigata*). Los resultados de esta investigación demostraron que este extracto presentó actividad contra radicales libres y radicales cationes (DPPH[•] y ABTS^{•+}, respectivamente), así como potencial para reducir iones metálicos (FRAP). En otra investigación, González-Montemayor *et al.* (2021) elaboraron extractos metanólicos de harina vaina de mezquite (*Prosopis glandulosa*), y reportaron que estos extractos presentaron actividad contra los radicales DPPH[•] y ABTS^{•+}, así como potencial para reducir iones metálicos. Mientras que Goyal *et al.* (2021) obtuvieron un extracto

acuoso y metanólico de orégano (*Origanum vulgare*), y reportaron que éstos presentaron alta capacidad para inhibir los radicales (DPPH[•] y ABTS^{*+}) y alta capacidad para reducir iones metálicos (FRAP).

Malathi y Murugesan (2021) obtuvieron extractos acuosos de *O. ficus-indica*, y reportaron que el extracto presentó capacidad para atrapar el radical peróxido y reducir iones metálicos. El Mannoubi (2021) investigó el efecto de diversos solventes (acetona metanol y etanol), a la misma concentración (80%), sobre la actividad antioxidante de extractos de piel y pulpa de nopal (*O. ficus-indica*). Los resultados de este estudio demostraron actividad antioxidante frente al radical libre DPPH[•] y al radical catión ABTS^{*+}, y alta capacidad para reducir iones metálicos (FRAP). De igual forma, se ha demostrado la actividad contra el radical DPPH[•] y ABTS^{*+} de plantas de zonas áridas, como la cubata (*Acacia cochliacantha*), vara prieta (*Acacia constricta*), torote prieto (*Bursera laxiflora*), torote (*Bursera microphylla*), tulviejo (*Jacquinia macrocarpa ssp pungens*), nopal (*O. ficus-indica*) y pitahaya (*Stenocereus thurberi*) (Castro-Enríquez *et al.*, 2020; Romero *et al.*, 2020; Vidal-Gutiérrez *et al.*, 2020).

Ramírez-Rojo *et al.* (2019a; 2019b) demostraron el poder reductor contra iones metálicos y la inhibición de radicales DPPH[•] de extractos etanólicos obtenidos del mezquite (*Prosopis valutina*). López-Romero *et al.* (2018) obtuvieron extractos etanólicos a partir de hojas de maguey (*A. angustifolia*), y demostraron la efectividad del extracto para inhibir los radicales DPPH[•] y ABTS^{*+} y reducir iones metálicos. También Palmeri *et al.* (2018) demostraron el efecto antioxidante del extracto acuoso de la pulpa de fruto rojo de nopal (*O. ficus-indica*) frente al radical DPPH[•]. Mientras que Núñez-Gastélum *et al.* (2018) reportaron la efectividad del extracto acuoso-metanólico de la raíz del guereque (*Ibervillea sonora*) para reducir iones metálicos, e inhibir los radicales DPPH[•] y ABTS^{*+}. Adicionalmente, se ha demostrado el poder contra el radical DPPH[•] de extractos etanólicos y metanólicos obtenidos de las hojas de las plantas cosahui (*Krameria erecta*), toji de mezquite (*Phoradendron californicum*), toji (*Struthanthus palmeri*), chapacolor (*Stegnosperma halimifolium*), hoja de sen (*Senna covessi*) y mezquite (*Prosopis laevigata*) (García-Andrade *et al.*, 2013; Jiménez-Estrada *et al.*, 2013).

Con base en lo anterior, queda demostrado el potencial antioxidante y antimicrobiano de las plantas de zonas áridas, lo cual se relaciona con

la presencia de compuestos fenólicos. Por ello, el uso de harinas y extractos de plantas puede ser considerado como una potencial estrategia para el desarrollo de nuevos aditivos alimentarios (Ramírez-Rojo *et al.*, 2018).

USO DE LAS PLANTAS DE ZONAS ÁRIDAS COMO ADITIVOS EN LA INDUSTRIA CÁRNICA

Composición química y calidad de la carne y los productos cárnicos

La carne es considerada como aquellas partes del animal, principalmente tejido muscular, que después de sufrir ciertas transformaciones bioquímicas han sido dictaminadas como inocuas y aptas para el consumo humano o se destinan para este fin (Cobos y Díaz, 2015). En relación con su composición química, la carne se compone de más del 70% de agua y 19% de compuestos nitrogenados proteicos (Cobos y Díaz, 2015), entre los que se incluye a las proteínas miofibrilares (actina, miosina, entre otras), sarcoplásmicas (mioglobina, entre otras) y tejido conectivo (colágeno y elastina, principalmente). El 1.5% corresponde a compuestos nitrogenados no proteicos (creatina, creatinina, nucleótidos y péptidos). En menor proporción, 1% son compuestos no nitrogenados (vitaminas C, A, B6, B12, D3, E, entre otras), entre 1 y 1.5% son carbohidratos (glucógeno), y 1% minerales (calcio, hierro, magnesio, fósforo, potasio, sodio, zinc, cobre, entre otros). Mientras que la grasa es uno de los componentes más variables (1 a 15%).

Por otra parte, en México la Norma Oficial Mexicana NOM-213-SSAI-2018 (Secretaría de Gobernación, 2018) define a los productos cárnicos como aquellos elaborados con carne, vísceras, grasa, partes comestibles, provenientes de mamíferos o aves, con la adición o no de otros ingredientes o aditivos, que pueden someterse a diferentes procesos. Con base en el proceso al que sea sometido, esta norma los clasifica como productos cárnicos crudos y cocidos (listos y no listos para su consumo), precocidos, curados, desecados, secos o salados, y madurados). Respecto a su composición, en productos cárnicos como hamburguesas, salchichas Frankfurt y chorizo, se reportó un contenido de humedad (38.5, 64.9 y 31.9%, respectivamente), proteína (16.5, 10.3 y 24.1%), grasa (12.0,

25.8 y 38.3%), minerales (1.5, 3.5 y 3.9%) y carbohidratos (31.5, 4.2 y 1.9%). La composición química de la carne y los productos cárnicos es muy variable y dependerá de la especie animal, el sexo, alimentación, tipo de producto, entre otros factores (Cobos y Díaz, 2015).

Por otra parte, la composición química de la carne y los productos cárnicos la convierten en un medio ideal para favorecer las reacciones de oxidación y el crecimiento de bacterias deteriorativas y patógenas, considerándose estos dos factores las principales causas de pérdida de calidad nutricional, fisicoquímica, microbiológica y sensorial. Las reacciones de oxidación promueven la degradación de lípidos y proteínas, lo cual conlleva a una reducción en los valores de pH, generación de productos potencialmente tóxicos y modificación de atributos sensoriales como olor, sabor y color, que en consecuencia reduce la intención de compra por parte del consumidor. Mientras, la incidencia de bacterias (*Enterobacteriaceae spp.*, *Lactobasillus spp.*, *Leuconostoc spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Salmonella spp.*, entre otras) en carne y productos cárnicos puede asociarse a un mal manejo de éstos durante el sacrificio, procesamiento y almacenamiento, y de igual forma se ve afectada la calidad. Por ello, el uso de aditivos sintéticos es la estrategia más utilizada en la prevención de estos factores (Papuc *et al.*, 2017).

La Norma Oficial Mexicana NOM-213-SSA-2002 (Secretaría de Gobernación, 2002) define a los aditivos como “sustancias que se adicionan directamente a los productos durante su elaboración, para proporcionar o intensificar aroma, color o sabor; o para mejorar su conservación, incrementando la calidad al proporcionar estabilidad oxidativa y microbiológica; entre otras funciones”. Además, en las normativas mexicanas NOM-213-SSA-2002 (Secretaría de Gobernación, 2002) y NOM-122-SSA1-1994 (Secretaría de Salud, 1994) se enlistan algunos de los aditivos permitidos en alimentos (carne y productos cárnicos), tales como ácido fosfórico, ácido L(+) tartárico, ácido cítrico, fumárico, entre otros; alfa tocoferol, butilhidroxianisol, terbutil hidroxiquinona, butilhidroxitolueno, mezcla de tocoferoles concentrados, nitratos o nitritos de sodio o potasio, entre otros. Sin embargo, el uso inadecuado de estos aditivos ha sido asociado con efectos nocivos en la salud del consumidor (Papuc *et al.*, 2017).

Aditivos de origen natural para conservar carne y productos cárnicos

Con base en el incremento en la demanda del consumidor en la adquisición y consumo de carne y productos cárnicos seguros, uno de los objetivos de la industria cárnica es incrementar el periodo de conservación y evitar la pérdida de calidad por efecto de las reacciones de oxidación y crecimiento microbiano, al sustituir el uso de aditivos sintéticos por aditivos de origen natural, como son las harinas y extractos de frutos, vegetales, hierbas y especias (Adamczak *et al.*, 2020; Pateiro *et al.*, 2021; Ramírez-Rojo *et al.*, 2018).

Los aditivos antioxidantes son aquellas “sustancias agregadas a los alimentos para evitar que el oxígeno presente en el aire provoque rancidez en la carne y productos cárnicos, es decir, cambios indeseables en el sabor o color” (USDA, 2015). En tanto, un aditivo antimicrobiano puede ser considerado como aquellas “sustancias que prologan la vida útil de los alimentos protegiéndolos contra el deterioro causado por los microorganismos, o que protegen contra el crecimiento de microorganismos patógenos” (Efenberger-Szmechtyk *et al.*, 2021). Por ello, el uso potencial como aditivo antioxidante y antimicrobiano de harinas y extractos de plantas de regiones de zonas áridas ha sido objeto de estudio en diversos trabajos de investigación.

Plantas de zonas áridas como antioxidante para carne y productos cárnicos

En relación con la actividad antioxidante de plantas de zonas áridas, Al-Hijazeen *et al.* (2021) reportaron que la incorporación de aceite esencial de orégano (*Origanum syriacum* L.) y de extracto de romero en carne de pollo molida cruda y cocida redujeron los niveles de oxidación de lípidos y proteínas, así como la pérdida de color rojo durante su almacenamiento (4°C, por siete días), en comparación con el control y BHT. En otro estudio, Peláez-Vital *et al.* (2021) demostraron que la incorporación de 0.05 y 0.1% del aceite esencial de orégano (*Origanum compactum*) en hamburguesas de borrego disminuyó los valores de oxidación de lípidos y la pérdida de color rojo, sin afectar los atributos sensoriales (sabor, textura

y aceptabilidad general) durante su almacenamiento (4° C, por diez días), al comparar con el control. En el mismo año, Ozaki *et al.* (2021) reportaron que la adición de aceite esencial de orégano (100 mg/kg) en salchichas cocidas fermentadas incrementó la calidad sensorial (aroma y aceptabilidad) y redujo la pérdida de color rojo y los niveles de oxidación en salchichas durante su almacenamiento (20° C, por sesenta días).

En otras investigaciones, Villalobos-Delgado *et al.* (2020) demostraron que la incorporación de 50 ml/kg de extracto etanólico de epazote (*Chenopodium ambrosoides* L.) en carne cruda molida de res redujo los valores de pH y oxidación de lípidos, no afectó la pérdida de color rojo e incrementó la aceptabilidad sensorial (color, olor y apariencia) durante su almacenamiento (-18° C, por noventa días). Romero *et al.* (2020) mostraron que la adición de 1% de la harina de pulpa del fruto de nopal con piel naranja y roja (*Opuntia ficus-indica*) en hamburguesas de res disminuyó la oxidación de lípidos, la pérdida de color, la dureza y los atributos sensoriales (color, sabor, ternura y aceptación general) durante su almacenamiento (4° C, por quince días). Además, Herrera-Balandrano *et al.* (2019) reportaron que la inclusión de 2 000 y 4 000 mg/kg del extracto de aceite de orégano (*Lippia berlandieri*) en pechuga cruda de pollo redujo el pH, la capacidad de retención de agua, las pérdidas de peso por cocción, e incrementó la actividad antioxidante total durante su almacenamiento (4° C, por catorce días). Además, Ramírez-Rojo *et al.* (2019b) demostraron que la inclusión de 0.05 y 0.1% del extracto etanólico de hojas de mezquite (*Prosopis velutina*) en hamburguesas de cerdo redujo cambios en los valores de pH, pérdida de color rojo, capacidad de retención de agua, actividad antioxidante total, formación de metabioglobina y oxidación de lípidos durante su almacenamiento (4 °C, por diez días en oscuridad).

Por otra parte, Perales-Jasso *et al.* (2018) reportaron que la adición de 0.1% de aceite esencial y harina de orégano (*L. berlandieri*) en chorizo de cerdo redujo la pérdida de color rojo e incrementó el olor del producto durante su almacenamiento (4° C, por siete días), sin presentar cambios en el color apariencia, firmeza y aceptabilidad general. Palmeri *et al.* (2018) demostraron que la incorporación de diluciones (1:2 y 1:5) del extracto acuoso de la pulpa de fruto rojo de nopal (*O. ficus-indica*) en lomo de res en rodajas redujo los cambios en los valores de pH y color rojo durante

su almacenamiento (4° C, por ocho días). Además, López-Romero *et al.* (2018) indicaron que la adición de 1 400 ppm del extracto etanólico de hojas de maguey (*Agave angustifolia*) en hamburguesas de cerdo disminuyó los cambios en los valores de pH, formación de metamioglobina y oxidación de lípidos durante su almacenamiento (4° C, por ocho días), sin afectar el índice de rojo y la pérdida de color sensorial). Mientras que Martín-Sánchez *et al.* (2013) reportaron que la inclusión de 2.5 y 5% de pasta de dátil (*Phoenix dactylifera* L.) en paté de hígado de cerdo redujo los valores de pH, color rojo y dureza, así como ciertos atributos sensoriales (color, sabor y dureza), sin afectar la aceptabilidad general.

Plantas de zonas áridas como antimicrobianos para carne y productos cárnicos

En relación con la actividad antimicrobiana de plantas de zonas áridas, Herrera-Balandrano *et al.* (2019) reportaron que la adición de 2 000 y 4 000 mg/kg del extracto de aceite de orégano (*L. berlandieri*) en pechuga cruda de pollo redujo la cuenta total de psicrótrofos aerobios durante su almacenamiento (4° C, por catorce días), sin presentar diferencias en la cuenta de mesófilos. También, Perales-Jasso *et al.* (2018) reportaron que la adición de 0.1% de aceite esencial y harina de orégano (*L. berlandieri*) en chorizo de cerdo no afectó la cuenta de mesófilos aerobios durante su almacenamiento (4° C, por siete días).

En otro estudio, Palmeri *et al.* (2018) demostraron que la incorporación de diluciones (1:2 y 1:5) del extracto acuoso de la pulpa de fruto rojo de nopal (*O. ficus-indica*) en lomo de res en rodajas redujo la cuenta total de mesófilos aerobios, *Enterobacterias* y *Pseudomonas* durante su almacenamiento (4° C, por ocho días). Además, López-Romero *et al.* (2018) indicaron que la adición de 1 400 ppm del extracto etanólico de hojas de maguey (*Agave angustifolia*) en hamburguesas de cerdo redujo la cuenta total de mesófilos aerobios durante su almacenamiento (4° C, por ocho días), sin afectar la cuenta total de psicrótrofos. Mientras que Hernández-Hernández *et al.* (2017) reportaron que la inclusión de aceite esencial de hojas de orégano (*L. graveolens*) en un recubrimiento sobre la carne fresca de cerdo redujo la cuenta total de mesófilos aerobios y

bacterias ácido lácticas, *Brochothrix thermosphacta*, *Pseudomonas fragi* y *Salmonella infantis* durante su almacenamiento (4° C, por quince días), sin afectar la calidad sensorial de la carne.

TENDENCIAS FUTURAS

A partir de la gran cantidad de plantas que se encuentran distribuidas en zonas áridas, es necesario realizar más estudios en los que se evalúen las propiedades orientadas a su uso como aditivos para diferentes tipos de alimentos. También es necesario conocer los posibles efectos fisicoquímicos, microbiológicos y sensoriales adversos o benéficos que pudiera tener la aplicación de harinas y extractos de nuevas plantas de estudio, tanto en carne como productos cárnicos. Asimismo, es necesario el uso de tecnologías modernas, como la encapsulación de los compuestos bioactivos de plantas, con el fin de incrementar la estabilidad antioxidante y antimicrobiana del material que se ha de utilizar como aditivo, sin que éste afecte la calidad al ser incorporado a la matriz cárnica.

CONCLUSIONES

La carne y los productos cárnicos son continuamente afectados por las reacciones de oxidación y por el deterioro microbiano, por lo que su seguridad y calidad están comprometidas durante su procesamiento y almacenamiento. Las harinas y extractos obtenidos de plantas de zonas áridas –como epazote, nopal, orégano, mezquite, maguey, palmera datilera, entre otros– pueden utilizarse para sustituir eficazmente a los aditivos sintéticos en carne y productos cárnicos, debido a la presencia de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y antimicrobianas.

REFERENCIAS

- ADAMCZAK, A., Ożarowski, M., y Karpiński, T. M. (2020). “Antibacterial activity of some flavonoids and organic acids widely distributed in plants”, *Journal of Clinical Medicine*, 9(1), 109.
- AL-HIJAZEEN, M. (2021). “The combination effect of adding rosemary extract and oregano essential oil on ground chicken meat quality”, *Food Science and Technology*. [En prensa].
- AZMIR, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M. H. A., Ghafoor, K., Narulaini, N. A. N., y Omar, A. K. M. (2013). “Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: a review”, *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426-436.
- BANDARANAYAKE, W. M. (2002). “Bioactivities, bioactive compounds and chemical constituents of mangrove plants”, *Wetlands Ecology and Management*, 10(6), 421-452.
- BERNHOF, A., Siem, H., Bjertness, E., Meltzer, M., Flaten, T., y Holmsen, E. (2010). “Bioactive compounds in plants—benefits and risks for man and animals”, en *The Norwegian Academy of Science and Letters*. Oslo, 11-18.
- BOHRER, B. M. (2017). “Nutrient density and nutritional value of meat products and non-meat foods high in protein”, *Trends in Food Science & Technology*, 65, 103-112.
- CASTRO-ENRÍQUEZ, D. D., Montaña-Leyva, B., Toro-Sánchez, D., Carmen, L., Juárez-Onofre, J. E., Carvajal-Millán, E., López-Ahumada, G. A., Barreras-Urbina, C. G., Tapia-Hernández, J. A., y Rodríguez-Félix, F. (2020). “Effect of ultrafiltration of pitahaya extract (*Stenocereus thurberi*) on its phytochemical content, antioxidant capacity, and UPLC-DAD-MS profile”, *Molecules*, 25(2), 281.
- CHAVES, N., Santiago, A., y Alías, J. C. (2020). “Quantification of the antioxidant activity of plant extracts: analysis of sensitivity and hierarchization based on the method used”, *Antioxidants*, 9(1), 76.
- COBOS, A., y Díaz, O. (2015). “Chemical composition of meat and meat products”, en P. C. K. Cheung, y B. M. Mehta (eds.), *Handbook of food chemistry*. Berlín / Heidelberg: Springer / Verlag, 471-506.

- COMECARNE (2019). “Compendio estadístico de la carne 2019”. México. https://comecarne.org/wp-content/uploads/2020/07/Compendio_Estad%C3%ADstico_2019_-_Comecarne.pdf
- Efenberger-Szmechtyk, M., Nowak, A., y Czyzowska, A. (2021). “Plant extracts rich in polyphenols: antibacterial agents and natural preservatives for meat and meat products”, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(1), 149-178.
- EL MANNOUBI, I. (2021). “Effect of extraction solvent on phenolic composition, antioxidant and antibacterial activities of skin and pulp of Tunisian red and yellow–orange *Opuntia Ficus Indica* fruits”, *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(1), 643-651.
- FAUSTMAN, C., Sun, Q., Mancini, R., y Suman, S. P. (2010). “Myoglobin and lipid oxidation interactions: mechanistic bases and control”, *Meat Science*, 86(1), 86-94.
- GARCÍA-ANDRADE, M., González-Laredo, R. F., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Rosales-Castro, M., y Medina-Torres, L. (2013). “Mesquite leaves (*Prosopis laevigata*), a natural resource with antioxidant capacity and cardioprotection potential”, *Industrial Crops and Products*, 44, 336-342.
- GONZÁLEZ-MONTEMAYOR, A. M., Solanilla-Duque, J. F., Flores-Gallegos, A. C., López-Badillo, C. M., Ascacio-Valdés, J. A., y Rodríguez-Herrera, R. (2021). “Green bean, pea and mesquite whole pod flours nutritional and functional properties and their effect on sourdough bread”, *Foods*, 10(9), 2227.
- GOYAL, S., Tewari, G., Pandey, H. K., y Kumari, A. (2021). “Exploration of productivity, chemical composition, and antioxidant potential of *Origanum vulgare* L. grown at different geographical locations of Western Himalaya, India”, *Journal of Chemistry*, 2021.
- HERRERA-BALANDRANO, D. D., Martínez-Rojas, D., Luna-Maldonado, A. I., Gutiérrez-Soto, G., Hernández-Martínez, C. A., Silva-Vázquez, R., Flores-Girón, E., Quintero-Ramos, A., y Méndez-Zamora, G. (2020). “Conservación de pechugas de pollo con aceite esencial de orégano mexicano”, *Biotechnia*, 22(2), 119-127.
- HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, E., Lira-Moreno, C. Y., Guerrero-Legarreta, I., Wild-Padua, G., Di Pierro, P., García-Almendárez, B. E., y Regalado-González, C. (2017). “Effect of nanoemulsified and

- microencapsulated Mexican oregano (*Lippia graveolens* Kunth) essential oil coatings on quality of fresh pork meat”, *Journal of Food Science*, 82(6), 1423-1432.
- JIMÉNEZ-ESTRADA, M., Velázquez-Contreras, C., Garibay-Escobar, A., Sierras-Canchola, D., Lapizco-Vázquez, R., Ortiz-Sandoval, C., Burgos-Hernández, A., y Robles-Zepeda, R. E. (2013). “*In vitro* antioxidant and antiproliferative activities of plants of the ethnopharmacopeia from northwest of Mexico”, *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 13(1), 1-8.
- KLANČNIK, A., Piskernik, S., Jeršek, B., y Možina, S. S. (2010). “Evaluation of diffusion and dilution methods to determine the antibacterial activity of plant extracts”, *Journal of Microbiological Methods*, 81(2), 121-126.
- LÓPEZ-ROMERO, J. C., Ayala-Zavala, J. F., Peña-Ramos, E. A., Hernández, J., y González-Ríos, H. (2018). “Antioxidant and antimicrobial activity of *Agave angustifolia* extract on overall quality and shelf life of pork patties stored under refrigeration”, *Journal of Food Science and Technology*, 55(11), 4413-4423.
- MALATHI, G., y Murugesan, A. K. (2021). “Phytochemical analysis, antioxidant and antibacterial properties of *Opuntia Ficus-indica* (L.) mill. against the wound infecting bacteria”, *International Journal of Botany Studies*, 6(2), 367-373.
- MARTÍN-SÁNCHEZ, A. M., Ciro-Gómez, G., Sayas, E., Vilella-Esplá, J., Ben-Abda, J., y Pérez-Álvarez, J. Á. (2013). “Date palm by-products as a new ingredient for the meat industry: application to pork liver pâté”, *Meat Science*, 93(4), 880-887.
- NÚÑEZ-GASTÉLUM, J. A., Hernández-Rivas, R., Rodrigo-García, J., Laura, A., Álvarez-Parrilla, E., Díaz-Sánchez, Á. G., Muñoz-Bernal, O. A., Cota-Ruiz, K., y Martínez-Martínez, A. (2018). “Contenido de polifenólicos, actividad antioxidante y antimicrobiana de la raíz de *Ibervillea sonora*”, *Biotecnica*, 20(3), 23-27.
- OCAMPO-OLALDE, R., Delgado-Suárez, E. J., y Gutiérrez-Pabello, J. A. (2015). “Harina de cáscara de tuna como fuente de fibra y su efecto sobre las características físico-químicas y sensoriales de salchichas bajas en sodio y grasa”, *Nacameh*, 9(2), 54-65.

- OZAKI, M. M., Dos Santos, M., Ribeiro, W. O., de Azambuja Ferreira, N. C., Picone, C. S. F., Domínguez, R., Lorenzo, J. M., y Polloño, M. A. R. (2021). “Radish powder and oregano essential oil as nitrite substitutes in fermented cooked sausages”, *Food Research International*, 140, 109855.
- PALMERI, R., Parafati, L., Restuccia, C., y Fallico, B. (2018). “Application of prickly pear fruit extract to improve domestic shelf life, quality and microbial safety of sliced beef”, *Food and Chemical Toxicology*, 118, 355-360.
- PAPUC, C., Goran, G. V., Predescu, C. N., Nicorescu, V., y Stefan, G. (2017). “Plant polyphenols as antioxidant and antibacterial agents for shelf-life extension of meat and meat products: classification, structures, sources, and action mechanisms”, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(6), 1243-1268.
- PATEIRO, M., Gómez-Salazar, J. A., Jaime-Patlán, M., Sosa-Morales, M. E., y Lorenzo, J. M. (2021). “Plant extracts obtained with green solvents as natural antioxidants in fresh meat products”, *Antioxidants*, 10(2), 181.
- PELAES-VITAL, A. C., Guerrero, A., Guarnido, P., Cordeiro Severino, I., Olleta, J. L., Blasco, M., do Prado, I. N., Maggi, F., y Campo, M. D. M. (2021). “Effect of active-edible coating and essential oils on lamb patties oxidation during display”, *Foods*, 10(2), 263.
- PERALES-JASSO, Y. J., Gámez-Noyola, S. A., Aranda-Ruiz, J., Hernández-Martínez, C. A., Gutiérrez-Soto, G., Luna-Maldonado, A. I., Silvas-Vázquez, R., Hume, M. E., y Méndez-Zamora, G. (2018). “Oregano powder substitution and shelf life in pork chorizo using Mexican oregano essential oil”, *Food Science & Nutrition*, 6(5), 1254-1260.
- QUIRÓS-SAUCEDA, A. E., Palafox, H., Robles-Sánchez, R. M., y González-Aguilar, G. A. (2011). “Interacción de compuestos fenólicos y fibra dietaria: capacidad antioxidante y biodisponibilidad”, *Biotecnología*, 13(3), 3-11.
- RAMÍREZ-ROJO, M. I., Vargas-Sánchez, R. D., del Mar Torres-Martínez, B., Torrescano-Urrutia, G. R., y Sánchez-Escalante, A. (2018). “Extractos de hojas de plantas para conservar la calidad

- de la carne y los productos cárnicos frescos. Revisión”, *Biotecnia*, 20(3), 155-164.
- RAMÍREZ-ROJO, M. I., Vargas-Sánchez, R. D., Hernández-Martínez, J., Martínez-Benavidez, E., Sánchez-Escalante, J. J., Torrescano-Urrutia, G. R., y Sánchez-Escalante, A. (2019a). “Actividad antioxidante de extractos de hoja de mezquite (*Prosopis velutina*)”, *Biotecnia*, 21(1), 113-119.
- RAMÍREZ-ROJO, M. I., Vargas-Sánchez, R. D., Torres-Martínez, B. D. M., Torrescano-Urrutia, G. R., Lorenzo, J. M., y Sánchez-Escalante, A. (2019b). “Inclusion of ethanol extract of mesquite leaves to enhance the oxidative stability of pork patties”, *Foods*, 8(12), 631.
- ROMERO, M. C., Fogar, R. A., Fernández, C. L., Doval, M. M., Romero, A. M., y Judis, M. A. (2020). “Effects of freeze-dried pulp of *Eugenia uniflora* L. and *Opuntia ficus-indica* fruits on quality attributes of beef patties enriched with n-3 fatty acids”, *Journal of Food Science and Technology*, 1-9.
- RUIZ-BUSTOS, E., Velázquez, C., Garibay-Escobar, A., García, Z., Plascencia-Jatomea, M., Cortez-Rocha, M. O., Hernandez-Martínez, J., y Robles-Zepeda, R. E. (2009). “Antibacterial and antifungal activities of some Mexican medicinal plants”, *Journal of Medicinal Food*, 12(6), 1398-1402.
- SALEH, I., y Abu-Dieyeh, M. H. (2021). “Novel *Prosopis juliflora* leaf ethanolic extract as natural antimicrobial agent against food spoiling microorganisms”, *Scientific Reports*, 11(1), 1-17.
- Secretaría de Gobernación (2018). “Norma Oficial Mexicana NOM-213-SSA1-2018. Productos cárnicos procesados y los establecimientos dedicados a su proceso”. México: Segob. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5556645&fecha=03/04/2019.
- Secretaría de Gobernación (2002). “Norma Oficial Mexicana NOM-213-SSA1-2002. Productos cárnicos procesados. Especificaciones sanitarias, método de prueba”. México: Segob. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/213ssa102.html>.
- Secretaría de Salud (1994). “Norma Oficial Mexicana NOM-122-SSA1-1994. Productos de la carne. Productos cárnicos curados y cocidos, y curados emulsionados cocidos. Especificaciones sanitarias”.

México. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/122ssa14.html>.

- SHARIFI-RAD, J., Zhong, J., Ayatollahi, S. A., Kobarfard, F., Faizi, M., Khosravi-Dehaghi, N., y Suleria, H. A. (2021). “LC-ESI-QTOF-MS/MS characterization of phenolic compounds from *Prosopis farcta* (Banks & Sol.) JF Macbr, and their potential antioxidant activities”, *Cellular and Molecular Biology*, 67(1), 189-200.
- TEIXEIRA, A., y Rodrigues, S. (2020). “Consumer perceptions towards healthier meat products”, *Current Opinion in Food Science*, 38, 147-154.
- USDA (2021). “Livestock and poultry: world markets and trade”. EE.UU.: United States Department of Agriculture. https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf.
- USDA (2015). “Additives in meat and poultry products”. EE.UU.: United States Department of Agriculture. <http://www.fda.gov/food/ingredientpackaginglabeling/foodadditivesingredients/ucm115326.htm>.
- VIDAL-GUTIÉRREZ, M., Torres-Moreno, H., Contreras, C. A. V., Valenzuela, L. A. R., y Robles-Zepeda, R. (2020). “Actividad antioxidante y antiproliferativa de seis plantas medicinales del noroeste de México”, *Biotechnia*, 22(3), 40-45.
- VILLALOBOS-DELGADO, L. H., González-Mondragón, E. G., Ramírez-Andrade, J., Salazar-Govea, A. Y., y Santiago-Castro, J. T. (2020). “Oxidative stability in raw, cooked, and frozen ground beef using Epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.)”, *Meat Science*, 168, 108187.

SECCIÓN III
Salud

CAPÍTULO 19
BEBIDAS FERMENTADAS
TRADICIONALES MEXICANAS
DE LAS ZONAS ÁRIDAS DE MÉXICO

KARINA ROBLEDO-MÁRQUEZ¹

VICTORIA RAMÍREZ²

AARON FERNANDO GONZÁLEZ-CÓRDOVA³

YADIRA RAMÍREZ-RODRÍGUEZ⁴

LUIS GARCÍA-ORTEGA L.⁵

JOYCE TRUJILLO⁶

RESUMEN

En México se han descrito cerca de doscientos productos fermentados, de los cuales aproximadamente veinte son bebidas, que se han obtenido mediante métodos de fermentación rústica y ancestral en diferentes comunidades indígenas mexicanas; la mayoría de las bebidas fermentadas se han empleado en ceremonias, trabajos agrícolas y otras ocasiones festivas. Para su elaboración, se utilizan diferentes sustratos, algunos de

¹ División de Biología Molecular, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipicyt), San Luis Potosí, San Luis Potosí, CP 78216. México.

² Departamento de Cirugía Experimental. Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán. Tlalpan, Ciudad de México, CP 14080, México.

³ Laboratorio de Calidad, Autenticidad y Trazabilidad de los Alimentos y de Química y Biotecnología de Productos Lácteos, Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Animal (CTAOA), Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD), La Victoria, Hermosillo, Sonora, CP 83304, México.

⁴ División de Biología Molecular, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipicyt). Departamento de Ingeniería Genética. Centro de Investigación y Estudios Avanzados de IPN (Cinvestav). Irapuato, Guanajuato, 36824, México.

⁵ Departamento de Ingeniería Genética. Centro de Investigación y Estudios Avanzados de IPN (Cinvestav). Irapuato, Guanajuato, CP 36824, México.

⁶ División de Materiales Avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), San Luis Potosí, 78216. México. Autora de correspondencia: daniela.trujillo@ipicyt.edu.mx.

ellos obtenidos de plantas, donde se produce una fermentación anaeróbica espontánea de baja escala y con poco control. En México, algunas de las bebidas fermentadas se consideran fuentes nutricionales y bebidas funcionales; el estudio de esos productos ha revelado la presencia de muchos compuestos de importancia biológica. Además, ancestralmente, a estas bebidas se les atribuyen propiedades curativas contra diversas enfermedades. El objetivo de esta revisión es resaltar la información disponible sobre cinco bebidas fermentadas tradicionales mexicanas de zonas áridas y semiáridas; sus usos tradicionales y sus procesos de fermentación, así como estudios toxicológicos, químicos, nutricionales y funcionales, vistos desde diferentes áreas de investigación. El pulque y el pozol son las bebidas con mayor cantidad de propiedades saludables descritas; sendecho, huapilla y colonche fueron las menos caracterizadas. En cuanto a los compuestos con actividad biológica, destaca la presencia de polifenoles, antocianinas y saponinas, las cuales fueron las moléculas más abundantes en las bebidas. Finalmente, es importante continuar con esta investigación, con el fin de determinar los microorganismos que intervienen en el proceso de fermentación, así como las propiedades organolépticas y benéficas que otorgan el consumo de bebidas fermentadas tradicionales mexicanas.

PALABRAS CLAVE: bebidas fermentadas, beneficios funcionales, comida tradicional, fermentación de alimentos, microbiología.

INTRODUCCIÓN

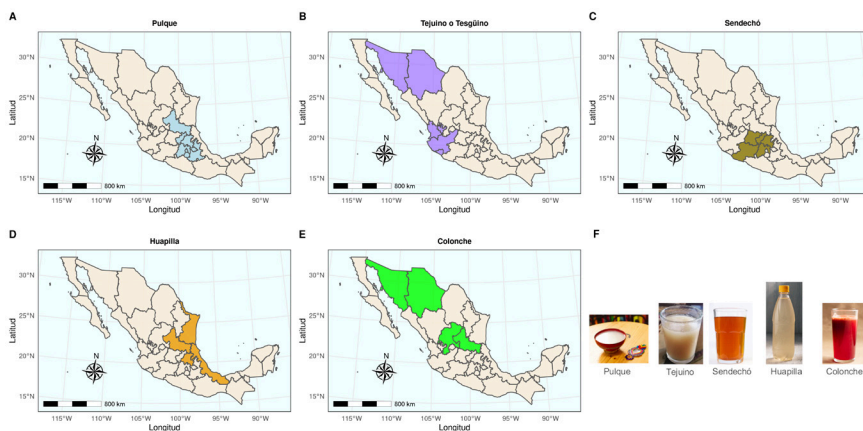
La fermentación es un proceso anaeróbico que produce ácido pirúvico a partir de la oxidación incompleta de la glucosa con el fin de aceptar electrones producidos por la coenzima nicotinamida adenina dinucleótido (NAD⁺). Existen diferentes tipos de fermentación (alcohólica, acética, láctica, butírica, butanodiólica, propiónica, etc.), realizadas por distintos microorganismos, como bacterias, levaduras y hongos, que están presentes de forma natural o añadidos intencionalmente en el proceso de fermentación (Pérez-Armendáriz y Cardoso-Ugarte, 2020; Tortora *et al.*, 2010).

La fermentación se usa como técnica para la preservación de alimentos, con el fin de aumentar la vida útil de éstos; existe una amplia diversidad de productos que pueden ser fermentados con este fin, incluyendo la leche, la carne, el pescado, los cereales, las frutas, las verduras, las legumbres, los tubérculos y las bebidas alcohólicas y no alcohólicas (Pérez-Armendáriz y Cardoso-Ugarte, 2020). Además, el proceso de fermentación mejora el sabor, aroma, textura y valor nutricional; desintoxica y elimina sustancias o bacterias indeseables presentes en los alimentos crudos, por ejemplo, fitatos, taninos y microorganismos patógenos (Narzary *et al.*, 2016; Escobar-Zepeda *et al.*, 2020). Se ha estimado que existen aproximadamente 3 500 alimentos y bebidas fermentadas en todo el mundo (Tamang *et al.*, 2017). México ofrece una gran variedad de alimentos fermentados y la mayoría se consideran endémicos. Éstos se elaboran por los diversos pueblos originarios de México. Algunos alimentos o bebidas son elaborados a partir de agave, cacao, maíz, chile, tuna, palma, piña (Blandino *et al.*, 2003; Ramírez-Guzmán *et al.*, 2019; Valerino-Perea *et al.*, 2019).

Específicamente, en nuestro país existen doscientos productos fermentados, de los cuales aproximadamente veinte son bebidas. El consumo de estas bebidas por parte de los pueblos originarios se realiza tradicionalmente y ocurre durante eventos religiosos; muchos de estos productos se pueden encontrar para la venta al público en zonas urbanas y rurales y en los diferentes estados de México (Ramírez-Guzmán *et al.*, 2019; Robledo-Márquez *et al.*, 2021). Los procesos para la producción de estas bebidas se basan en el conocimiento empírico que se ha transmitido de generación en generación. Sin embargo, poco se conoce

sobre sus características, preparación y sus posibles efectos en la salud. Por lo tanto, este capítulo tiene como objetivo presentar la información disponible sobre seis bebidas fermentadas tradicionales mexicanas, en particular de las zonas áridas y semiáridas (figura 1), desde usos tradicionales, procesos de fermentación, estudios toxicológicos, químicos, nutricionales y funcionales realizados hasta la fecha.

FIGURA 1



Bebidas fermentadas tradicionales en zonas áridas. A) Agave s(a) Pulque: Estado de México, Hidalgo, Querétaro, Ciudad de México, Morelos, Puebla, Tlaxcala y San Luis Potosí (Azul); B) Zea mays. (a) Tejuino o tesgüino: Chihuahua, Colima, Jalisco, Nayarit y Sonora (Morado); (b) Sendechó: Estado de México, Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Tlaxcala, Puebla y Veracruz (Café); C) *Hechtia glomerata*. (a) Agua de huapilla: Hidalgo, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz (Anaranjado); D) *Opuntia streptacantha*. (a) Colonche: Chihuahua, Sonora, San Luis Potosí y Zacatecas (Verde).
Fuente: Elaboración propia.

BEBIDAS TRADICIONALES FERMENTADAS ELABORADAS A PARTIR DE *ÁGAVE* SPP.

Pulque

El aguamiel se deriva de la extracción de la savia del *Agave*; se puede producir de 600 a 1 500 litros por planta (Puente-Garza *et al.*, 2018). El aguamiel se extrae de diferentes especies de *Agave*, principalmente *Agave*

salmiana, *Agave atrovirens*, *Agave mapisaga*, *Agave americana*, *Agave marmorata*, *Agave scapose*, *Agave ferox* y *Agave seemanniana* (Escalante *et al.*, 2016; Blas-Yañez *et al.*, 2019; Álvarez-Ríos *et al.*, 2020; Pérez-Armendáriz y Cardoso-Ugarte, 2020). El producto de la fermentación espontánea del aguamiel se llama pulque; esta bebida estaba reservada para ceremonias prehispánicas, trabajos agrícolas, nacimientos y funerales (Escalante *et al.*, 2016; Becerra, 1988), se vende localmente en pulquerías, mercados, ferias o pequeños negocios familiares, y por lo general se consume en su forma natural, pero también se puede mezclar con avena, cacahuete, tomate, piña, fresa, mango, apio, entre otros ingredientes, y se conocen como “curados” (Escalante *et al.*, 2016; Rojas-Rivas y Cuffia, 2020).

Proceso de fermentación y microorganismos asociados

El pulque es un líquido lechoso, viscoso y ligeramente ácido con un contenido de alcohol de 4 a 7 ml de alcohol por cada 100 ml (Gay Lussac); esto, de acuerdo con el proceso de producción empleado. Dicha producción se inicia con una porción de savia recién recolectada, y el proceso de fermentación comienza en condiciones no estériles (Escalante *et al.*, 2016; Matías Luis *et al.*, 2019); el tiempo de fermentación varía y suele durar de tres a seis horas, dependiendo de la calidad y madurez del aguamiel (poco turbia, espesa, muy dulce, con sabor de neutro a ligeramente ácido similar a planta fresca), la temporada climática, el tipo de *Agave* y la región de procedencia (Escalante *et al.*, 2004). Al respecto, existen normas oficiales mexicanas (NMX-V-022.1972) que regulan la calidad y las propiedades sensoriales requeridas para el pulque.

Los microorganismos involucrados son bacterias productoras de ácido láctico (LAB, por sus siglas en inglés); bacterias productoras de ácido acético (AAB, por sus siglas en inglés) y levaduras productoras de alcohol (González-Vázquez *et al.*, 2015; González-Vázquez y Mayorga-Reyes, 2017; Capozzi *et al.*, 2020). La diversidad de microorganismos se ha asociado con los siguientes filos: *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Cyanobacteria*, *Fusobacteria* y *Nitrospira* (Escobar-Zepeda *et al.*, 2020). Hasta ahora, se ha reportado la presencia de *Leuconostoc* spp., responsable de la viscosidad del pulque, la cual es atribuida a la

producción de dextranos y fructanos; *Lactobacillus* spp., responsable de incrementar la acidez y la presencia de compuestos aromáticos; *Acetobacter* spp., cuya presencia genera acidez; *Zymomonas mobilis*, que participa en la producción de etanol; *non-Saccharomyces* y *Saccharomyces* spp., responsables de la producción de etanol y otros metabolitos secundarios, como aminoácidos, vitaminas y compuestos volátiles (Yu y Zhang, 2003; Herrera-Solórzano *et al.*, 2008; Cavanagh *et al.*, 2015; González-Vázquez *et al.*, 2015; Escalante *et al.*, 2016; Reyes y Garduño, 2016; Matías Luis *et al.*, 2019; Álvarez-Ríos *et al.*, 2020). También se ha reportado la presencia de *Candida* sp., *Kluyveromyces* spp., *Microbacterium arborescens*, *Flavobacterium johnsoniae*, *Gluconobacter oxydans*, *Hafnia alvei*, *Lactococcus lactis*, *Erwinia rhapontici*, *Enterobacter* sy *Acinetobacter radioresistens*; un estudio metagenómico describió que dichos microorganismos contribuyen al proceso de fermentación, no obstante, sus funciones específicas no se han descrito (Torres-Rodríguez *et al.*, 2014; González-Vázquez *et al.*, 2015; Álvarez-Ríos *et al.*, 2020; Escobar-Zepeda *et al.*, 2020).

Compuestos perjudiciales o microorganismos patógenos

Durante la producción de pulque, el proceso puede contaminarse con bacterias patógenas. Gómez-Aldapa *et al.* (2012) observaron la presencia de patógenos como *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium*, *Shigella flexneri*, *Shigella sonnei*, *Staphylococcus aureus*, *Brucella* spp., *Campylobacter* sy *Vibrio cholera* durante la fermentación del aguamiel y hasta el producto final. Sin embargo, Escobar-Zepeda *et al.* (2020) mostraron que la presencia de estos patógenos se mantenía en proporciones muy bajas (<0,005%). Asimismo, *Citrobacter* spp., *Enterobacter* spp., *Klebsiella* spp., *Serratia* spp., *Yersinia* spp., *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Salmonella entérica* fueron inactivadas durante el proceso de fermentación, por competencia con el resto de los microorganismos presentes, lo cual sugiere que no representan un riesgo para la salud (Gómez-Aldapa *et al.*, 2012).

Estudios químicos y nutricionales

A medida que ocurre la fermentación, los compuestos químicos del aguamiel se transforman hasta que se obtiene el pulque. La primera etapa posee un alto contenido de sacarosa, pero después del proceso de fermentación ésta disminuye considerablemente, mientras que la concentración de etanol aumenta debido a los microorganismos presentes, en específico, levaduras. Otro resultado de la fermentación es la disminución de pH; se sabe que el pulque tiene un pH más bajo que el aguamiel (pH 4.0 vs 5.4) (Álvarez-Ríos *et al.*, 2020). Hernández-López *et al.* (2018) reportaron que el contenido de humedad fue ~ 92%; el contenido de proteína total, 2.71%, en contraste con el contenido de 6% reportado por Escalante *et al.* (2016). Se ha descrito que el pulque es una fuente de vitaminas, minerales y aminoácidos, mientras que el aguamiel tiene un alto contenido de calcio, fósforo, magnesio, hierro, zinc, cobre, boro y todos los aminoácidos esenciales, excepto metionina (Morales de León *et al.*, 2005; Escalante *et al.*, 2016). Además, aporta compuestos bioactivos, como folatos, saponinas y esteroides (Tovar *et al.*, 2008), así como enzimas, asociadas con actividades metabólicas y catalíticas asociadas con la síntesis de polímeros de carbohidratos y fibra soluble (tiamina fosfato cinasa, riboflavina, cobalamina, sintasa de biotina, fructanosucrasa y dextranasa) (Escobar-Zepeda *et al.*, 2020). Se ha descrito la presencia de fructanos en los agaves (conocidos como agavinas) y se consideran una fuente alternativa de prebióticos, además que se han asociado con efectos benéficos para la salud (Escalante *et al.*, 2016; Alvarado-Jasso *et al.*, 2020).

Efectos saludables

Desde la época prehispánica, el consumo de pulque fue popular en el posparto para mejorar la producción de leche y aliviar el dolor de pecho, para el tratamiento de trastornos gastrointestinales (GI), tratar desmayos, fiebre e inducir la menstruación, entre otros (Backstrand *et al.*, 2001; Becerra, 1988; Villalpando *et al.*, 1993). Además, su consumo se ha asociado con el incremento de los niveles séricos de hierro en mujeres mexicanas no embarazadas (Backstrand *et al.*, 2002). También se

ha propuesto que una baja ingesta de pulque (200 ml, aproximadamente) tiene un efecto benéfico durante la lactancia, derivado del contenido de micronutrientes (Backstrand *et al.*, 2001; Backstrand *et al.*, 2004). Sin embargo, también se han descrito efectos nocivos del consumo excesivo de pulque durante el embarazo, como alteraciones en el desarrollo fetal y altos niveles de etanol durante la gestación (Backstrand *et al.*, 2001; Backstrand *et al.*, 2004). Esta bebida es una excelente fuente de agentes antimicrobianos contra *E. coli*, *S. aureus* y *Helicobacter pylori* (Giles-Gómez *et al.*, 2016; Cervantes-Elizarrarás *et al.*, 2019; Álvarez-Ríos *et al.*, 2020), así como una fuente rica de probióticos antiinflamatorios, provenientes de *Lactobacillus casei* J57, *Lactobacillus plantarum* LBH1064, *Lactobacillus sanfranciscensis* LBH1068 y *Lactobacillus composti* LBH1072 (González-Vázquez *et al.*, 2015; Torres-Maravilla *et al.*, 2016; Escobar-Zepeda *et al.*, 2020; Pérez-Armendáriz y Cardoso-Ugarte, 2020). Además, el consumo de agavinas se ha asociado con promover una mejor absorción de calcio en mujeres posmenopáusicas, con la prevención del cáncer de colon, mayor absorción de hierro y mayor actividad antioxidante (Escalante *et al.*, 2016; Santos-Zea *et al.*, 2016).

BEBIDAS TRADICIONALES FERMENTADAS ELABORADAS A PARTIR DE ZEA MAYS

Tesgüino o tejuino

El tesgüino o tejuino es una bebida alcohólica fermentada que aún producen y consumen en el norte de México (Kennedy, 1963; Novillo-Verdugo, 2015; Ramírez-Guzmán, 2019). Sin embargo, se ha documentado que esta bebida fue consumida por los rarámuris, *o'dam*, yoremes, tepehuans y wixárikas en la época precolombina (Cruz y Ulloa, 1973). Es conocida como cerveza mexicana o cerveza de maíz; su producción se remonta a siglos atrás.

El tesgüino, también llamado *batári* o *pacikí* por los rarámuris, tiene una gran importancia social, económica y religiosa; este pueblo originario lo consume en celebraciones religiosas, como bautizos, bodas, funerales; y otros eventos, como las fiestas de la cerveza, llamadas

“tesgüinadas”, donde participa casi todo el pueblo; se considera un marcador de estatus social porque el hombre con mayor rango e importancia social lo bebe primero; debido a que los rarámuris viven en zonas aisladas, las “tesgüinadas” son el factor que propicia la interacción social (Kennedy, 1963; Herrera y Ulloa, 1973).

Proceso de fermentación y microorganismos asociados

Como se mencionó antes, el tesgüino se prepara mediante un método tradicional, y se produce a partir de granos de maíz secos (es posible utilizar tallos de maíz) que se remojan de 24 a 48 h y se dejan germinar durante cinco días en un lugar oscuro. Este paso es fundamental para evitar que los brotes tomen un color verde y obtener el sabor deseado. Después de la germinación, los granos o tallos de maíz se trituran y se hierven durante 12 h con óxido de calcio o cal, proceso llamado nixtamalización; después de enfriarlos y colarlos, se obtiene un atole amarillo. El atole se coloca en una olla tesgüinera, vasija tradicional; en este paso se agrega azúcar o piloncillo, y se añaden algunos catalizadores para la fermentación, por un lapso de 24 h o incluso 72 h. Los catalizadores son comúnmente plantas endémicas, como *roninowa* (*Stevia serrata Cav*), *rojisuwi* (*Chimaphila maculata*), *ubitukuwari* (*Datura meteloides Dunal*), *camomila* (*Hamaemelum nobile*) y *frijolillo* (*Cojoba arborea*). En algunas partes de Chihuahua, el tesgüino se mezcla con plantas alucinógenas, como el peyote (*Lophophora williamsii*) (Kennedy, 1963; Cruz y Ulloa, 1973; Herrera y Ulloa, 1973). En Colima y Jalisco, simplemente se mezcla con piloncillo para obtener una bebida de bajo contenido alcohólico llamada tejuino (Nava, 2009).

Las LAB, AAB y las levaduras regulan el proceso de fermentación en esta bebida y se han aislado los siguientes microorganismos: *Cryptococcus* spp., *Lactobacillus* spp., *Leuconostoc* spp., *Streptococcus* spp., *S. cerevisiae* (Cruz y Ulloa, 1973; Nava, 2009; Cabezas, 2016), *Candida guilliermondii* y *Saccharomyces kluyveri* (Cruz y Ulloa 1973; Paredes-Lopez *et al.*, 2006). El aislamiento de *Pantoea anthophila* mostró su capacidad para producir galactooligosacáridos (GOS), que han mostrado actividad prebiótica en ensayos clínicos (Yáñez-Ñeco *et al.*, 2017; Plata *et al.*, 2019).

Compuestos nocivos o microorganismos patógenos

Excepto por el contenido de alcohol, no hay evidencia de que el tesgüino sea una bebida tóxica; su producción en el laboratorio mostró la presencia de compuestos no tóxicos (Cejudo-Valentín *et al.*, 2019).

Estudios químicos y nutricionales

El tesgüino es viscoso, amarillento, con sabor amargo y un pH que varía de 2 a 5. El contenido nutricional se reporta en la tabla 2 (Cruz y Ulloa, 1973), mientras el contenido de alcohol varía de 2 a 20%, debido a diferencias en la variedad de maíz, a las bacterias y levaduras presentes, así como a las condiciones controladas de los biorreactores empleados en este estudio (Nava, 2009; Cejudo-Valentín *et al.*, 2019). Se sabe que la nixtamalización reduce el contenido de proteínas y carbohidratos en el maíz, y se ha descrito que los compuestos fenólicos y antocianinas se reducen en la masa de maíz después de hervir, debido a las altas temperaturas (Bressani, 1990; Gaxiola-Cuevas *et al.*, 2017). Nava Arenas *et al.* (2009) determinaron las concentraciones de polifenoles (unidades de ácido gálico) y antocianinas en el tesgüino, y describieron que los polifenoles se redujeron de 42 a 54% durante la ebullición, aumentando después de la fermentación hasta un 74%. El ácido ferúlico mostró un patrón similar al de los polifenoles durante la cocción, pero después de la fermentación los niveles aumentan significativamente. Por último, las antocianinas se redujeron de manera drástica durante la ebullición del tesgüino, en un 80%. Además, se observó que la cantidad de antioxidantes en tesgüino fue similar a los niveles presentes en los granos de maíz antes de la fermentación (Nava *et al.*, 2009).

Efectos saludables

No se han descrito efectos funcionales del tesgüino en humanos; sin embargo, los estudios *in vitro* muestran que bacterias aisladas, como *Weissella cibaria* y *L. citreum*, podrían usarse como probióticos e inhibir

bacterias patógenas. Asimismo, se conoce que *L. citreum* mejora la colonización de bacterias benéficas en el tracto digestivo (Silva *et al.*, 2017; Pérez-Armendáriz y Cardoso-Ugarte, 2020). La principal limitación de usar tesguüino como alimento funcional es el contenido de alcohol, ya que en exceso provocaría intoxicación.

SENDECHÓ

Ésta es una bebida hecha de malta pigmentada de maíz y chiles, se fermenta con pulque y su color puede ser blanco o rojo, pero el sabor siempre es suave, dulce y ligeramente ácido (Unai, 2019). Se le conoce con el nombre de sendechó o zeyrecha; se la considera una cerveza desde la época prehispánica; fue utilizada principalmente por los otomíes y los mazahuas en sus celebraciones religiosas (Génin, 1924).

Proceso de fermentación y microorganismos asociados

Los granos de maíz se colocan en una canasta con hojas de *Buddleja americana* o “teposan”; una vez dentro, éstos se exponen al sol y se remojan continuamente durante 4-5 días para que germinen los granos. Posteriormente, los granos germinados se secan y se muelen con chile (*Capsicum sp.*). El resultado es una harina que se cuece en una olla de barro con agua; una vez que esta mezcla se enfría, se agrega el inóculo inicial, que se llama “ixquini” (una porción de sendechó o pulque previamente elaborado), para formar una bebida ácida llamada “cté” (Lorence-Quiñones *et al.*, 1999; Godoy *et al.*, 2003). Algunos de los microorganismos presentes en el proceso de fermentación del pulque se encuentran involucrados en la elaboración del sendechó, por ejemplo, *Acetobacter spp.*, *Candida spp.*, *Lactobacillus sp.*, *Leuconostoc spp.*, *Kluyveromyces spp.*, *S.cerevisiae* y *Z. mobilis*, entre otros (Torres-Rodríguez *et al.*, 2014; González-Vázquez *et al.*, 2015; Álvarez-Ríos *et al.*, 2020). Sin embargo, no se han realizado estudios específicos sobre los microorganismos asociados al sendechó. Recientemente, un nuevo proceso de fermentación ha sido descrito para la recuperación de esta bebida, mediante la adición de lúpulo y levadura

de cerveza en combinación con ingredientes tradicionales, es decir, chile guajillo (*Capsicum annuum*) y malta de maíz azul, con el fin de desarrollar un nuevo tipo de sendechó, empleando el proceso de fermentación alta (ale), para dar como resultado diferentes tipos de cerveza de maíz (Flores-Calderón *et al.*, 2017).

Estudios químicos y nutricionales

Flores-Calderón *et al.* (2017) compararon ocho estilos de sendechó que resultaron de las diferentes combinaciones de tres ingredientes (un tipo de malta, lúpulo y chile guajillo). Los autores determinaron azúcares reductores totales, alcohol, pH, acidez total, antocianinas, polifenoles y actividad antioxidante, y observaron una diferencia significativa en los azúcares reductores totales para cada estilo; el contenido de etanol producido en cervezas verdes y maduras fue 1.6% de alcohol; los valores de pH fueron de 4.5-4.8; la acidez total en cervezas maduras se encontró en el rango de 0.18-0.26 g/100 ml de ácido láctico, asociado con la formación de ácidos acético, fórmico, pirúvico, málico, cítrico y láctico. Finalmente, los autores informaron de un alto contenido de antocianinas y compuestos fenólicos, lo que se asocia a la actividad antioxidante. En el sendechó, al igual que en las hojas de *B. americana*, se ha descrito la presencia de flavonoides y glucósidos como aucubina iridoide y nigrosido iridoide (Cáceres *et al.*, 1993; Juárez-Vázquez *et al.*, 2013). En *C. annuum*, contiene capsaicinoides (capsaicina, dihidrocapsaicina, nordihidrocapsaicina), carotenoides, tiamina y ácido ascórbico (Sanati *et al.*, 2018). Hasta la fecha, no existen estudios nutricionales de sendechó, pero sí se han realizado diversos estudios nutricionales de los ingredientes utilizados para la elaboración de esta bebida.

Efectos saludables

Hasta ahora, sólo se conoce que el sendechó tiene efectos antioxidantes, que se atribuyen principalmente a los efectos sinérgicos de los antioxidantes del maíz azul (polifenoles, antocianinas, ácidos p-cumárico, vanílico

y protocatéquico), la malta caramelo (antocianinas y melanoidinas), chiles (flavonoides) y lúpulos (chalconas preniladas), que mostraron niveles considerables de capacidad antioxidante, utilizando marcadores estándares como ABTS (ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) y DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidrazil) (Flores-Calderón *et al.*, 2017).

BEBIDAS TRADICIONALES FERMENTADAS ELABORADAS A PARTIR DE BROMELIA SPP.

Agua de Huapilla

En México existen seis especies del género *Bromelia* (Mondragón *et al.*, 2011). Los productos derivados de *Bromelia* han sido utilizados principalmente por aztecas, mayas, incas, quechuas, yanomamis y otros pueblos para la fabricación de cercas vivas, redes y cuerdas de pesca, así como para ornamentación. Estas plantas también se han utilizado en la medicina y alimentación tradicionales, incluidas bebidas fermentadas y no fermentadas utilizando la fruta de *Bromelia alsodes*, *Bromelia hemisphaerica*, *Bromelia karatas*, *Bromelia pinguin*, *Bromelia chrysantha* y *Bromelia nidus-puellae*; las primeras cuatro, endémicas de México (Morales y Berrones-Benítez, 2007; Mondragón *et al.*, 2011; Conabio, 2020). Las frutas se emplean habitualmente en la producción de huapilla o piñuela, una bebida refrescante fermentada, elaborada a partir de *B. karatas* y *B. pinguin* en Tamaulipas y norte de Veracruz (Arzaba-Villalba *et al.*, 2018; Conabio, 2020; Espejo-Serna *et al.*, 2010), la producción y recolección de los frutos se ocurre principalmente en los meses de mayo a noviembre (Pío-León *et al.*, 2009).

Proceso de fermentación y microorganismos asociados

El proceso de fermentación se realiza colocando las cáscaras fermentadas del fruto de *Bromelia* en agua con piloncillo, en barricas de madera para inducir la fermentación espontánea durante 10 a 15 días, sin preinóculo (Godoy *et al.*, 2003; Romero-Luna *et al.*, 2017). Después del proceso de

fermentación, la bebida está lista para su consumo. El agua de huapilla se vende generalmente en mercados al aire libre y se almacena en un barril de madera (Morales y Berrones-Benítez, 2007). Hasta la fecha, no se han identificado los microorganismos involucrados con el proceso de fermentación durante la producción de agua de huapilla, ni se ha informado de la presencia de compuestos nocivos o microorganismos patógenos.

El consumo de frutas frescas de *B. karatas* y *B. pinguin* se ha asociado con una sensación de ardor en la boca debido a la presencia de proteasas de cisteína (similar a la bromelina) (Abreu *et al.*, 2001; Meza-Espinoza *et al.*, 2017).

Estudios químicos y nutricionales

Los productores de agua de huapilla la consideran una bebida de bajo contenido alcohólico; sin embargo, no hay reportes científicos sobre su contenido en la bebida. En la actualidad, no se han estudiado las propiedades fisicoquímicas o nutricionales de la huapilla, pero se conoce que los frutos de *B. karatas* y *B. pinguin* tienen excelentes propiedades nutricionales, siendo muy buena fuente de vitamina C, calcio, magnesio, fósforo, manganeso, zinc y fibra, así como compuestos bioactivos como taninos, flavonoides, terpenos, saponinas, cumarinas y ácidos grasos (Pío-León *et al.*, 2009; Meza-Espinoza *et al.*, 2017).

Efectos saludables

Hasta la fecha, no existen estudios científicos que describan los efectos sobre la salud del agua de huapilla, pero se han descrito las propiedades del extracto, jugo o fruta fresca de *Bromelia* (Meza-Espinoza *et al.*, 2017). Por ejemplo, las frutas hervidas o infusiones de la planta se han utilizado en el tratamiento de trastornos del tracto respiratorio (Argueta *et al.*, 1994), escorbuto (Chan-Quijano *et al.*, 2013), y trastornos del tracto urinario (Manetti *et al.*, 2009). Díaz Camacho *et al.* (2013) publicaron una patente sobre un método de preparación de bebidas que contienen fruto de *Bromelia* (*B. pinguin*); indicaron que este fruto aporta propiedades

funcionales asociadas a la prevención de enfermedades como gripe, tos ferina; combate parásitos, entre otras aplicaciones. El jugo de esta fruta se ha utilizado como antihelmíntico y antibacteriano (*Lombricus terrestris*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Enterococcus*, *Salmonella*, *Shigella*, *Escherichia* y *Pseudomonas*) (Abreu *et al.*, 2001; Pío-León *et al.*, 2009). Se ha caracterizado que las proteasas de cisteína contenidas en la fruta tienen propiedades antifúngicas, antiinflamatorias, antitrombóticas, antifibróticas y antiasmáticas (Camacho-Hernández *et al.*, 2002; Meza-Espinoza *et al.*, 2017). Estas proteasas de cisteína pueden tener un potencial uso en la industria de elaboración de cerveza, detergentes, alimentos y farmacéutica (Meza-Espinoza *et al.*, 2017, 2018).

BEBIDAS FERMENTADAS ELABORADAS CON OPUNTIA STREPTACANTHA

Colonche

Las plantas del género *Opuntia* son el grupo más abundante de la familia *Cactaceae*, las cuales se extienden por América, Europa, Asia, África y Australia (Ojeda-Linares *et al.*, 2020). La tuna suele consumirse fresca. Derivado de la biotecnología moderna, se han desarrollado estrategias con el objetivo de incrementar la vida útil y el valor comercial de la tuna y sus productos; se ha impulsado el desarrollo de procesos artesanales, dando lugar a productos únicos como el queso de tuna, los caramelos y el vino de tuna (colonche). El colonche se obtiene por fermentación natural del jugo de tuna roja (*O. streptacantha*), y es valorado por su color y sabor (Navarrete-Bolaños *et al.*, 2013; Díaz-Lima y Vélez-Ruiz 2017). El nombre *colonche* proviene de la lengua náhuatl: *nochoctli*, de las palabras *nochtli* = frutos de cactus, y *octli* = savia de agave fermentada; fue producido y consumido en la época precolombina por los chichimecas, pueblos originarios de la región norte de México; actualmente es consumido en las zonas áridas del noroeste de México por grupos étnicos como los rarámuris de Chihuahua, los yoremes de Sonora, y se consume habitualmente en San Luis Potosí y Zacatecas. Sin embargo, el consumo de esta bebida tradicional fermentada ha disminuido debido a

la escasa información de su producción (Ulloa y Herrera, 1978; Ojeda-Linares *et al.*, 2020).

Proceso de fermentación y microorganismos asociados

El procedimiento para la producción de colonche se ha mantenido casi sin cambios y parece ser una costumbre que ha sobrevivido durante siglos (Ulloa y Herrera, 1978). Los frutos rojos de tuna se recogen y se pelan con un cuchillo *in situ*, seleccionando los frutos maduros para la producción de colonche; y cuando los frutos rojos son escasos, se pueden agregar frutos amarillos y blancos, lo que resulta en cambios de sabor, color y textura de la bebida (Ojeda-Linares *et al.*, 2020); una vez sin la cáscara, los frutos se trituran a mano y se colocan dentro de ollas de barro, con una temperatura constante, lo que da lugar a una fermentación espontánea durante la noche por 12 h. Ocasionalmente, para acelerar la fermentación, se agregan catalizadores, como una pequeña cantidad de colonche viejo o cáscaras de tuna, que contienen microorganismos nativos (bacterias y levaduras). Varios estudios han identificado diferentes cepas de levadura como *Torulopsis taboadae* (Ulloa y Herrera, 1978). Rodríguez-Lerma *et al.* (2011) observaron la existencia de una fase inicial predominante por especies con baja actividad fermentativa como *Candida* spp., *Hanseniopsis* spp., *Kloeckera* sy *Pichia* spp., seguida de una segunda fase donde predominaron las levaduras tolerantes a etanol, como *S. cerevisiae* y en algunos casos *S. uvarum*. En otro estudio, las principales especies aisladas fueron *Enterococcus* spp., *Lactobacillus* spp., *Leuconostoc* spp., *Pediococcus* sy *Weissella* sL. *plantarum* fue la especie más frecuente (Verón *et al.*, 2017). El colonche es una bebida ligeramente butirácea, dulce, carbonatada y de sabor agradable, y se sirve inmediatamente para un consumo fresco (Ulloa y Herrera, 1978; Ojeda-Linares *et al.*, 2020).

En un estudio del vino de tuna (*O. streptacantha*), se describió el contenido de *Pichia fermentans*, que tiene alta capacidad de producción de compuestos volátiles, las cuales aumentan las propiedades aromáticas del vino, y una baja capacidad de producción de etanol debida a *S. cerevisiae* (Rodríguez-Lerma *et al.*, 2011).

Compuestos nocivos o microorganismos patógenos

La concentración máxima de metanol en los vinos está regulada para evitar riesgos en la salud de los consumidores. Actualmente, en México no existe un estándar para el vino de tuna, pero se pueden utilizar como referencia los estándares internacionales (Estados Unidos, Canadá, Italia y Suiza). Estas regulaciones establecen límites que van desde 15 a 30 mg/100 ml. Por ejemplo, se ha reportado que el vino de tuna se halla dentro de las regulaciones internacionales (Navarrete-Bolaños *et al.* 2013; Verón *et al.* 2019).

Estudios químicos y nutricionales

No existen estudios sobre las características químicas o nutricionales del colonche elaborado con el proceso de fermentación espontánea. Sin embargo, Verón *et al.* (2019) realizaron un estudio que evaluó el efecto de la fermentación, utilizando *L. plantarum* sobre la composición nutricional del jugo de tuna fermentada versus jugo de tuna no fermentada de *Opuntia ficus-indica*. Los autores observaron un alto contenido de vitamina C en el jugo de tuna fermentada y un mayor contenido de betalaínas. Navarrete-Bolaños *et al.* (2013) analizaron los compuestos volátiles presentes en el vino de tuna (*O. streptacantha*) fermentado por *P. fermentans* y *S. cerevisiae*, mediante cromatografía de gases (GC), y observaron presencia de alcoholes y ácidos orgánicos.

Efectos saludables

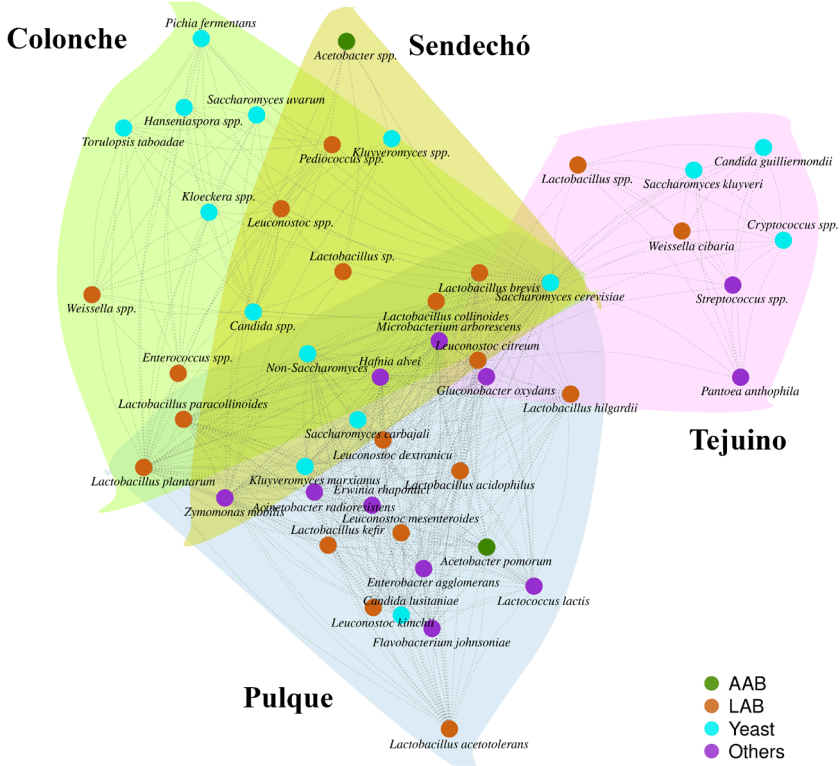
La mayoría de los beneficios nutricionales de los productos fermentados son conferidos por los microorganismos involucrados en la fermentación. En este sentido, la humanidad ha seleccionado microorganismos con acción benéfica para consumo humano y eliminando microorganismos patógenos de estas bebidas fermentadas utilizando diferentes estrategias desde la antigüedad (Ojeda-Linares *et al.*, 2020). Un estudio mostró que el jugo de tuna fermentada con *L. plantarum* tiene actividad

antioxidante asociada con los compuestos fenólicos que contiene, ya que actúan como agentes reductores. Además, los mecanismos antioxidantes de los ácidos hidroxicinámico e hidroxibenzoico también están relacionados con la capacidad de aumentar los niveles de enzimas antioxidantes y disminuir el estrés oxidativo (Verón *et al.* 2019).

ANÁLISIS DE REDES Y ASOCIACIONES

A lo largo de este capítulo observamos que estas bebidas poseen propiedades funcionales asociadas a el proceso de fermentación, describimos los estudios químicos, nutricionales, funcionales y adversos y realizamos un análisis de redes con los microorganismos descritos hasta ahora. La Figura 2 muestra que las especies de microorganismos más frecuentes son las levaduras (*S. cerevisiae*, *Candida inconspicua*), AAB (*Zymomonas mobilis*) y LAB (*Lactobacillus plantarum*, *Lactococcus lactis*, *Lactobacillus acidophilus* y *Lactobacillus casei*), también es posible observar que las bebidas hechas con agave y maíz tienen mayor cantidad de microorganismos comunes en comparación con la bebida de tuna, cabe mencionar que estos resultados pueden derivarse de la falta de estudios y su adecuada caracterización.

FIGURA 2



Redes de interacción microbiana para bebidas fermentadas tradicionales de las zonas áridas. Las redes de interacción se construyeron utilizando el paquete Igraph de R. Los colores de los nodos representan un tipo de microorganismo. Los nodos verdes representan bacterias ácido acéticas (AAB), los nodos naranja representan las bacterias ácido lácticas (LAB), los nodos cian representan bacterias con características metabólicas diferentes de las de AAB y LAB, los nodos blanco representan levaduras y los nodos morado representan hongos. El tamaño de los nodos representa el número de comunidades a las que pertenece cada microorganismo. Las comunidades están delimitadas por la bebida donde se ha aislado cada microorganismo. Pulque, tejuino, sendechó, huapilla y colonche. La zona ampliada muestra detalles de los microorganismos más abundantes y con mayor frecuencia en las bebidas.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIÓN Y TENDENCIAS FUTURAS

Este capítulo destaca el hecho de que las bebidas fermentadas mexicanas de las zonas áridas y semiáridas son una fuente de aislamiento de compuestos bioactivos con potencial para emplearse como nutraceuticos de consumo humano mediante su integración a la industria alimentaria y farmacéutica (figura 3). Además, describimos la importancia de la producción empírica y sus usos terapéuticos tradicionales transmitidos por los pueblos originarios de nuestro país (Robledo-Márquez *et al.*, 2021). La evidencia muestra que las bebidas fermentadas tienen múltiples beneficios para la salud humana, atribuyéndose directamente a una mejor nutrición, producción de compuestos químicos bioactivos tales como carbohidratos funcionales, minerales, vitaminas, fructooligosacáridos, antioxidantes, polifenoles, carotenoides entre otros. Algunas de estas bebidas, no obstante, contienen diferentes compuestos químicos sin importancia nutricional, como el etanol, y su consumo excesivo podría tener consecuencias negativas para la salud, como el alcoholismo o la cirrosis hepática.

FIGURA 3



Microorganismos asociados en el proceso de fermentación y efectos funcionales de las cinco bebidas fermentadas tradicionales consumidas en las zonas áridas de México.

Fuente:

Cabe resaltar que la presencia de múltiples bacterias sugiere que estas bebidas fermentadas mexicanas son una buena fuente para aislar bacterias con potencial uso como probiótico; aunado a ello, algunas cepas bacterianas producen compuestos químicos, como GOS, que en los últimos años han sido utilizados como prebióticos en varios estudios de ciencia básica y estudios clínicos. Asimismo, la producción de moléculas

químicas que tengan actividad antioxidante, antibacteriana o antiinflamatoria, entre otras.

Debe mencionarse que la fermentación tradicional no es un proceso industrializado; en éste no se controla la seguridad de las bebidas, lo cual permite la presencia de bacterias patógenas; de hecho, en algunos casos no se describen; sin embargo, como mencionan los autores, se encuentran en bajas cantidades y aparecen transitoriamente, para desaparecer al final del proceso de fermentación. Por último, es necesario realizar estudios con el objetivo de conocer el genoma de las bacterias asociadas con la producción de cada una de las bebidas fermentadas mexicanas de las zonas áridas. Además, faltan estudios que nos permitan conocer con precisión qué moléculas bioactivas posee cada bebida fermentada, y así propiciar el desarrollo de bioproductos de alta calidad con aplicaciones biotecnológicas en la industria alimentaria o farmacéutica, que tendrán un impacto económico en todas las comunidades productoras, aunado a la transmisión de conocimientos de nuestra cultura.

REFERENCIAS

- ABREU PAYROL, J., Miranda Martínez, M., Toledo Carrabeo, G., y Castillo García, O. (2001). "Actividad farmacológica preliminar del fruto de *Bromelia pinguin* L. (piña de ratón)", *Revista Cubana de Farmacia*, 35(1), 56-60.
- ALVARADO-JASSO, G. M., Camacho-Díaz, B. H., Arenas Ocampo, M. L., Jiménez-Ferrer, J. E., Mora-Escobedo, R., y Osorio-Díaz, P. (2020). "Prebiotic effects of a mixture of agavins and green banana flour in a mouse model of obesity", *Journal of Functional Foods*, 64, 103913.
- ÁLVAREZ-RÍOS, G. D., Figueredo-Urbina, C. J., y Casas, A. (2020). "Physical, chemical, and microbiological characteristics of pulque: management of a fermented beverage in Michoacán, Mexico", en *Foods*, (3): 361.
- ARGUETA VILLAMAR, A., Cano Asseleih, L. M., Rodarte, M. E., y Gallardo Vázquez, M. C.. (1994). *Atlas de las plantas de la medicina tradicional mexicana*. México: Instituto Nacional Indigenista.

- ARZABA-VILLALBA, C., Chazaro M., y Torres, G. (2018). “*Bromelia pinguin* L. a valuable natural resource in the dry tropical forest of Central Veracruz, Mexico”, *Journal of the Bromeliad Society*, 67(2), 84-91.
- BACKSTRAND, J. R, Allen, L. H., Martinez, E., y Pelto, G. H. (2001). “Maternal consumption of pulque, a traditional Central Mexican alcoholic beverage: relationships to infant growth and development”, *Public Health Nutrition*, 4(4), 883-91.
- BACKSTRAND, J. R, Goodman, A. H, Allen, L. H., y Pelto G. H. (2004). “Pulque intake during pregnancy and lactation in rural Mexico: alcohol and child growth from 1 to 57 months”, *European Journal of Clinical Nutrition*, 58(12), 1626-34.
- BECERRA, Ll. (1988). “El pulque, ancestral bebida obtenida del árbol de las maravillas”, *Nueva Antropología*, 10(34), 195-98, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15903409>.
- BLANDINO, A., Al-Aseeri, M.E., Pandiella, S.S., Cantero, D., y Webb, C. (2003). “Cereal-Based Fermented Foods and Beverages”. *Food Research International*, 36 (6): 527–543.
- BLAS-YÁÑEZ, S., Thomé-Ortiz, H., Espinoza-Ortega, A., y Bordi, I. (2019). “Informal sale of pulque as a social reproduction strategy. Evidence from Central Mexico”, *Revista de Geografía Agrícola*, 62, 49-67.
- BRESSANI, R. (1990). “Chemistry, technology, and nutritive value of maize tortillas”, *Food Reviews International*, 6(2), 225-64.
- CABEZAS ELIZONDO, D. A. (2016). “El tejuino, el bate y la tuba, bebidas refrescantes: símbolos que perduran de generación en generación en el estado de Colima”, *Revista Razón y Palabra*, 20(94), 89-104.
- CÁCERES, A., Fletes, L., Aguilar, L., Ramírez, O., Figueroa, L., Taracena, A. M., y Samayoa, B. (1993). “Plants used in Guatemala for the treatment of gastrointestinal disorders. 3. Confirmation of activity against enterobacteria of 16 plants”, *Journal of Ethnopharmacology*, 38(1), 31-8.
- CAMACHO-HERNÁNDEZ, I. L., Chávez-Velázquez, J. A., Uribe-Beltrán, M. J., Ríos-Morgan, A., y Delgado-Vargas, F. (2002). “Antifungal activity of fruit pulp extract from *Bromelia pinguin*”, *Fitoterapia*, 73(5), 411-1

- CAPOZZI, V., Fragasso, M., y Russo, P. (2020). “Microbiological safety and the management of microbial resources in artisanal foods and beverages: the need for a transdisciplinary assessment to conciliate actual trends and risks avoidance”, *Microorganisms*, 8(2), 306.
- CAVANAGH, D., Fitzgerald, G. F., y McAuliffe, O. (2015). “From field to fermentation: the origins of *Lactococcus Lactis* and its domestication to the dairy environment”, *Food Microbiology*, 47, 45-61.
- CEJUDO-VALENTÍN, R., Balderas-Montalvo, E. J., Contreras-Ramírez, A., Domínguez-Casas, M., Suárez-Ibáñez, C. E., y Bravo-Delgado, H. R. (2019). “Elaboración de una bebida alcohólica tipo tesguino con maíz (*Zea mays*) y naranja (*Citrus sinensis*)”, *Revista Tecnológica Agrobioalimentaria*, 3(1), 12-17.
- CERVANTES-ELIZARRARÁS, A., Cruz-Cansino, N. S., Ramírez-Moreno, E., Vega-Sánchez, V., Velázquez-Guadarrama, N., Zafra-Rojas, Q. Y., y Piloni-Martini, J. (2019). “In vitro probiotic potential of lactic acid bacteria isolated from aguamiel and pulque and antibacterial activity against pathogens”, *NATO Advanced Science Institutes Series E: Applied Sciences*, 9(3), 601.
- CHAN-QUIJANO, J. G., Pat-Canché, M. K., y Saragos-Méndez, J. (2013). “Conocimiento etnobotánico de las plantas utilizadas en Chanchah, Veracruz, Quintana Roo, México”, *Teoría y Praxis*, 14, 9-24.
- CONABIO (2020). *Enciclovida*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://enciclovida.mx/especies/138084-bromelia>.
- CRUZ, S., y Ulloa, M. (1973). “Alimentos fermentados de maíz consumidos en México y otros países latinoamericanos”. <http://repositorio.fciencias.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11154/142447/34ValimentosFermentados.pdf?sequence=1>.
- DÍAZ CAMACHO, S. P., Delgado Vargas, F., Parra Inzuna, M. A., y Cristerna González, J. L. (2013). “Method for preparing beverages containing *Bromelia pinguin*”, WIPO 2013058637A1. *World Patent*, issued 2013.
- DÍAZ-LIMA, C. y Vélez-Ruiz, J. F. (2017). “Effect of solids concentration on the physicochemical and flow properties of cactus pear juices of two varieties (*Opuntia ficus-indica* and *Opuntia streptacantha*)”, *Food and Bioprocess Technology*, 10(1), 199-212.

- ESCALANTE, A., López Soto, D. R., Velázquez Gutiérrez, J. E., Giles-Gómez, M., Bolívar, F., y López-Munguía, A. (2016). "Pulque, a traditional Mexican alcoholic fermented beverage: historical, microbiological, and technical aspects", *Frontiers in Microbiology*, 7, 1026.
- ESCALANTE, A., Rodríguez, M. E., Martínez, A., López-Munguía, A., Bolívar, F., y Gosset, G. (2004). "Characterization of bacterial diversity in pulque, a traditional Mexican alcoholic fermented beverage, as determined by 16S rDNA analysis", *FEMS Microbiology Letters*, 235 (2): 273–279.
- ESCOBAR-ZEPEDA, A., Montor, J., Olvera, C., Sánchez-Flores, A., y López-Munguía, A. (2020). "An extended taxonomic profile and metabolic potential analysis of pulque microbial community using metagenomics", *Journal of Food Science and Technology*, 5: 83-97.
- ESPEJO-SERNA, A., López-Ferrari, A. R., y Ramírez-Morillo, I. (2010). "Bromeliaceae *Flora del Bajío y regiones adyacentes*, 165, 1-82. [http://inecolbajio.inecol.mx/floradelbajio/documentos/fasciculos/ordinarios/Bromeliaceae%20165\(1\).pdf](http://inecolbajio.inecol.mx/floradelbajio/documentos/fasciculos/ordinarios/Bromeliaceae%20165(1).pdf).
- FLORES-CALDERÓN, D., Luna, H., Escalona-Buendía, H. B., y Verde-Calvo, J. R. (2017). "Chemical characterization and antioxidant capacity in blue corn (*Zea mays* L.) malt beers", *Journal of the Institute of Brewing*, 123, 506-518.
- GAXIOLA-CUEVAS, N., Mora-Rochín, S., Cuevas-Rodríguez, E. O., León-López, L., Reyes-Moreno, C., Montoya-Rodríguez, A., y Milán-Carrillo, J. (2017). "Phenolic acids profiles and cellular antioxidant activity in tortillas produced from Mexican maize landrace processed by nixtamalization and lime extrusion cooking", *Plant Foods for Human Nutrition*, 72 (3), 314-320.
- GÉNIN, A. (1924). "La cerveza entre los antiguos mexicanos y en la actualidad". Ed. Tip. Corral.
- GILES-GÓMEZ, M., Sandoval García, J. G., Matus, V., Campos Quintana, I., Bolívar, F., y Escalante A. (2016). "In vitro and in vivo probiotic assessment of *Leuconostoc mesenteroides* P45 isolated from pulque, a Mexican traditional alcoholic beverage", *SpringerPlus*, 5(1), 708.h.

- GODOY, A., Herrera, T., y Ulloa, M. (2003). “Bebidas alcohólicas no destiladas mexicanas”, en *Más allá del pulque y el tepache: las bebidas alcohólicas no destiladas indígenas de México*. México: UNAM, 59-77.
- GÓMEZ-ALDAPA, C. A., Díaz-Cruz, C. A., Villarruel-López, A., Torres-Vitela, M. R., Rangel-Vargas, E., y Castro-Rosas, J. (2012). “Acid and alcohol tolerance of *Escherichia coli* O157:H7 in pulque, a typical mexican beverage”, *International Journal of Food Microbiology*, 154(1-2), 79-84.
- GONZÁLEZ-VÁZQUEZ, R., Azaola-Espinosa, A., Mayorga-Reyes, L., Reyes-Nava, L. A., Shah, N. P., y Rivera-Espinoza, Y. (2015). “Isolation, identification and partial characterization of a *Lactobacillus casei* strain with bile salt hydrolase activity from pulque”, *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 7(4), 242-48.
- GONZÁLEZ-VÁZQUEZ, R., y Mayorga-Reyes, L. (2017). “Antibiotic resistance and tolerance to simulated gastrointestinal conditions of eight hemolytic *Bacillus pumilus* isolated from pulque, a traditional Mexican beverage”, *Food Science Biotechnology*, 26(2), 447-452.
- HERNÁNDEZ-LÓPEZ, Z., Rangel-Vargas, E., Castro-Rosas, J., Gómez-Aldapa, C. A., Cadena-Ramírez, A., Acevedo-Sandoval, O. A., Gordillo-Martínez, A. J., & Falfán-Cortés, R. N. (2018). “Optimization of a Spray-Drying Process for the Production of Maximally Viable Microencapsulated *Lactobacillus pentosus* Using a Mixture of Starch-Pulque as Wall Material”. *LWT*, 95, 216-222.
- HERRERA-SOLÓRZANO, M., Lappe-Oliveras, P., y Wachter-Rodarte, C. (2008). “Identificación polifásica de levaduras y bacterias ácido lácticas aisladas de aguamiel, pulque y semilla”, en VII Simposio de Producción de Alcoholes y Levaduras. https://smbb.mx/congresos%20smbb/acapulco09/TRABAJOS/AREA_X/OX-07.pdf.
- HERRERA, T., y Ulloa, M. (1973). “*Saccharomyces cerevisiae*, una levadura fermentadora del tesgüino de los indios tarahumaras”, *Boletín de la Sociedad Mexicana de Micología*, 7, 33-38
- JUÁREZ-VÁZQUEZ, M. C., Carranza-Álvarez, C., Alonso-Castro, A. J., González-Alcaraz, V. F., Bravo-Acevedo, E., Chamarro-Tinajero, F. J., y Solano, E. (2013). “Ethnobotany of medicinal plants used

- in Xalpatlahuac, Guerrero, México”, *Journal of Ethnopharmacology*, 148 (2), 521-527.
- KENNEDY, J. G. (1963). “Tesguino complex: the role of beer in Tarahumara culture”, *American Anthropologist*, 65, 620-40.
- LORENCE-QUIÑONES, A., Wachter-Rodarte, C., y Quintero-Ramírez, R. (1999). “Cereal fermentations in Latin American countries”, en N. F. Haard, S.A. Odunfa, C.-H. Lee, R. Quintero-Ramírez, A. Lorence-Quiñones y C. Wacher-Radarte (eds.), *Fermented cereals. A global perspective*. Roma: Food and Agriculture Organization, 1-94.
- MANETTI, L. M., Delaporte, R. M., y Laverde, A. (2009). “Metabólitos secundários da família *Bromeliaceae*”, *Quimica Nova*, 32(7), 1885-97.
- MATÍAS LUIS, G., Peña Caballero, V., Reyna González, W. Domínguez Díaz, R., y Martínez-Hernández, J. J. (2019). “Nutritional and medicinal value of pulque”, *Journal of Negative & No Positive Results*, 4(12), 1291-1303.
- MEZA-ESPINOZA, L., Gacía-Magaña, M. L., Vivar-Vera, M. A., Sáyago-Ayerdi, S. G., Chacón-López, A., Becerra-Verdín, E. M., Muy-Rangel, M. D., y Montalvo-González, E. (2017). “Ethnobotanical and nutritional aspects, and biological activity of fruit extracts of the genus *Bromelia*”, *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40, 425-437. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/610/61054247007/html/index.html>
- MEZA-ESPINOZA, L., Vivar-Vera, M. A., García-Magaña, M. L., Sáyago-Ayerdi, S. G. Chacón-López, A., Becerra-Verdín, E. M., y Montalvo-González, E. (2018). “Enzyme activity and partial characterization of proteases obtained from *Bromelia karatas* fruit and compared with *Bromelia pinguin* proteases”, *Food Science and Biotechnology*, 27, 1-9.
- MONDRAGÓN CHAPARRO, D. M., Ramírez Morillo, I. M., Flores Cruz, M., y García Franco, J. G. (2011). *La familia Bromeliaceae en México*. México: Universidad Autónoma de Chapingo. https://www.researchgate.net/publication/267324886_La_Familia_Bromeliaceae_en_Mexico.

- MORALES DE LEÓN, J. C., Bourgues-Rodríguez, H., y Camacho-Parra, M. E. (2016). “Pulque”, en M. E. Camacho-Parra, J. C. Morales de León y H. Bouges-Rodríguez (eds.), *Tables of composition of Mexican foods and food products*. México: Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, 84.
- MORALES, M. y Berrones-Benítez, E. (2007). *El uso de las plantas en la gastronomía huasteca en Tamaulipas, México*. México: Instituto Tamaulipeco para la Cultura y las Artes.
- NARZARY, Y., Brahma, J., Brahma, C., y Das, S. (2016). “A study on indigenous fermented foods and beverages of Kokrajhar, Assam, India”, *Journal of Ethnic Foods*, 3(4): 284-91.
- NAVA ARENAS, D. (2009). “Estudio de cambios estructurales y en algunos compuestos fenólicos durante la elaboración de tescüino de maíz azul (*Zea mays*)”, tesis de doctorado, Instituto Politécnico Nacional. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/7538>.
- NAVARRETE-BOLAÑOS, J. L., Fato-Aldeco, E., Gutiérrez-Moreno, K., Botello-Álvarez, J. E., Jiménez-Islas, H., y Rico-Martínez, R. (2013). “A strategy to design efficient fermentation processes for traditional beverages production: prickly pear wine”, *Journal of Food Science*, 78(10), M1560-M1568.
- NOVILLO-VERDUGO, M. A. (2015). “Tinajas arqueológicas del sitio los Guachimontones, sector Talleres, durante el Posclásico (900-1521d.c.): una aproximación a su uso y funcionalidad”, tesis de maestría, El Colegio de Michoacán, A.C.
- OJEDA-LINARES, C. I., Vallejo, M., Lappe-Oliveras, P., y Casas, A. (2020). “Traditional management of microorganisms in fermented beverages from cactus fruits in Mexico: an ethnobiological approach”, *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 16, 1.
- PAREDES-LÓPEZ, O., Guevara Lara, F., y Bello Pérez, L. A. (2006). “Maíz”, en O. Paredes-López, F. Guevara Lara y L. A. Bello Pérez (eds.), *Los alimentos mágicos de las culturas indígenas mesoamericanas*. México: FCE / SEP / Conacyt / CAB, 21-39.
- PÉREZ-ARMENDÁRIZ, B., y Cardoso-Ugarte, G. A. (2020). “Traditional Fermented Beverages in Mexico: Biotechnological, Nutritional, and Functional Approaches”. *Food Research International* 136: 109307. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109307>

- PÍO-LEÓN, J. F., López-Angulo, G., Paredes-López, O., Uribe-Beltrán, M. J., Díaz-Camacho, S.P., y Delgado-Vargas, F. (2009). “Physicochemical, nutritional and antibacterial characteristics of the fruit of *Bromelia pinguin* L.”, *Plant Foods for Human Nutrition*, 64(3), 181-7.
- PLATA, C., Cruz, C., Cervantes, L. G., y Ramírez, V. (2019). “The gut microbiota and its relationship with chronic kidney disease”, *International Urology and Nephrology*, 51(12), 2209-26.
- PUENTE-GARZA, C. A., Espinosa-Leal, C. A., y García-Lara, S. (2018). “Steroidal Saponin and Flavonol Content and Antioxidant Activity During Sporophyte Development of Maguey (*Agave salmiana*)”. *Plant Foods for Human Nutrition*, 73 (4), 287–294.
- RAMÍREZ-GUZMÁN, K. N., Torres-León, C., Martínez-Medina, G. A., de la Rosa, O., Hernández-Almanza, A., Alvarez-Perez, B., Araujo, R., Rodríguez-González. L., Londoño, L., Ventura, J., Rodríguez. R., Martínez, J. L., Aguilar, C. N. (2019). “Traditional Fermented Beverages in Mexico”. In A. M. Grumezescu & A. M. Holban (eds.) *Fermented Beverages*. Woodhead Publishing, 605–635.
- REYES NAVA, L. A., y Garduno, S. L. (2016). “Use of bile acids as a selection strategy for *Lactobacillus* strains with probiotic potential”, *Journal of Food and Nutritional Disorders*, 5, 1.
- ROBLEDO-MÁRQUEZ, K., Ramírez, V., González-Córdova, A. F., Ramírez-Rodríguez, Y., García-Ortega, L., y Trujillo, J. (2021). “Research opportunities: traditional fermented beverages in Mexico. Cultural, microbiological, chemical, and functional aspects”, *Food Research International*, 147, 110482.
- RODRÍGUEZ-LERMA, G. K., Gutiérrez-Moreno, K., Cárdenas-Manríquez, M., Botello-Álvarez, E., Jiménez-Islas, H., Rico-Martínez, R., y Navarrete-Bolaños, J. L. (2011). “Microbial ecology studies of spontaneous fermentation: starter culture selection for prickly pear wine production”, *Journal of Food Science*, 76(6), M346–52.
- ROJAS-RIVAS, E., y Cuffia, F. (2020). “Identifying consumers’ profile and factors associated with the valorization of pulque: a traditional fermented beverage in Central Mexico”, *Food Science and Technology International*, 26(7), 593-602.

- ROMERO-LUNA, H. E., Hernández-Sánchez, H., y Dávila-Ortiz, G. (2017). "Traditional fermented beverages from Mexico as a potential probiotic source", *Annals of Microbiology*, 67(9), 577–86.
- SANATI, S., Razavi, M. B., y Hosseinzadeh, H. (2018). "A review of the effects of *Capsicum annuum* L. and its constituent, capsaicin, in metabolic syndrome", *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 21(5), 439–448.
- SANTOS-ZEA, L., Leal-Díaz, A. M., Jacobo-Velázquez, D. A., Rodríguez-Rodríguez, J., García-Lara, S., y Gutiérrez-Urbe, J. A. (2016). "Characterization of concentrated agave saps and storage effects on browning, antioxidant capacity and amino acid content", *Journal of Food Composition and Analysis*, The United Nations University, International Network of Food Data Systems 45, 113–20.
- SILVA, M. S., Ramos, C. L., González-Ávila, M., Gschaedler, A., Arriзон, J., Schwan, R. F., y Dias, D. R. (2017). "Probiotic properties of *Weissella cibaria* and *Leuconostoc citreum* isolated from tejuino. A typical Mexican beverage", *LWT*, 86: 227-32.
- TAMANG, J. P., Holzappel, W. H., Shin, D. H., y Felis, G. E. (2017). "Editorial: Microbiology of ethnic fermented foods and alcoholic beverages of the world", *Frontiers in Microbiology*, 8: 1377.
- TORRES-MARAVILLA, E., Lenoir, M., Mayorga-Reyes, L., Allain, T., Sokol, H., Langella, P., Sánchez-Pardo, M. E., y Bermúdez-Humarán, L. G. (2016). "Identification of novel anti-inflammatory probiotic strains isolated from pulque", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(1), 385-96.
- TORRES-RODRÍGUEZ, I., Rodríguez-Alegría, M. E., Miranda-Molina, A., Giles-Gómez, M., Conca Morales, R., López-Munguía, A., Bolívar, F., y Escalante, A. (2014). "Screening and characterization of extracellular polysaccharides produced by *Leuconostoc kimchii* isolated from traditional fermented pulque beverage", *Springer-Plus*, 3, 583.
- TORTORA, G. J., Funke, B. R., y Case, C. L. (2010). "Microbial mechanisms of pathogenicity", en G. J. Tortora, B. R. Funke, y C. L. Case (eds.), *Microbiology: an introduction*. San Francisco, CA.: Pearson, 234-278.

- TOVAR, L. R., Olivos, M., & Gutierrez, M. E. (2008). "Pulque, an Alcoholic Drink from Rural Mexico, Contains Phytase. Its in Vitro Effects on Corn Tortilla". *Plant Foods for Human Nutrition*, 63 (4): 189–94.
- ULLOA, M., y Herrera, T. (1978). "*Torulopsis taboadae*, una nueva especie de levadura aislada del colonche de Zacatecas, México", *Boletín de la Sociedad Mexicana de Micología*, 12: 5-12.
- UNAI (2019). "SENDECHÓ, la cerveza precolombina". <https://www.delgranoalacopa.com/sendecho-la-cerveza-precolombina/>.
- VALERINO-PEREA, S., Lara-Castor, L., Armstrong, M., y Papadaki, A. (2019). "Definition of the traditional Mexican diet and its role in health: a systematic review", *Nutrients*, 11(11), 2803.
- VERÓN, H. E., Di Risio, H. D., Isla, M. I., y Torres, S. (2017). "Isolation and selection of potential probiotic lactic acid bacteria from *Opuntia ficus-indica* fruits that grow in Northwest Argentina", *LWT*, 84, 231-40.
- VERÓN, H. E., Gauffin Cano, P., Fabersani, E., Sanz, Y., Isla, M. I., Fernández Espinar, Gil Ponce, J. V., y Torres, S. (2019). "Cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice fermented with autochthonous *Lactobacillus plantarum* S-811", *Food & Function*, 10(2),1085-1097.
- VILLALPANDO, S., Flores-Huerta, S., Fajardo, A., Hernandez-Beltran, M. J. (1993). "Ethanol consumption during pregnancy and lactation. Changes in the nutritional status of predominantly breastfeeding mothers". *Archives of Medical Research*, 24(4), 333-338.
- YÁÑEZ-ÑEKO, C., Rodríguez-Colinas, B., Amaya-Delgado, L., Ballesteros, A., Gschaedler, A., Plou, F., y Arrizon, J. (2017). "Galactooligosaccharide production from *Pantoea anthophila* strains isolated from 'tejuino', a Mexican traditional fermented beverage", *Catalysts*, 7(8), 242.
- YU, Z., y Zhang, H. (2003). "Pretreatments of cellulose pyrolysate for ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia sp.* YZ-1 and *Zymomonas mobilis*", *Biomass and Bioenergy*, 24(3), 257-62.

CAPÍTULO 20
COMPUESTOS BIOACTIVOS
EN CACTÁCEAS COMO UNA FUENTE
DE ALIMENTOS FUNCIONALES

JANET MARÍA LEÓN-MORALES¹

SOLEDAD GARCÍA-MORALES²

DIANA MARÍA AMAYA-CRUZ³

ALEYDA PÉREZ HERRERA⁴

RESUMEN

Las cactáceas de los géneros *Opuntia*, *Hylocereus* y *Stenocereus* han sido fuente de alimento y medicina desde épocas prehispánicas hasta la fecha. Sus frutos son una buena fuente de proteínas, carbohidratos, minerales y fibra dietética, y su consumo se asocia con beneficios para la salud. Las betalainas y los compuestos fenólicos han sido ampliamente caracterizados usando diferentes técnicas espectrométricas y resonancia magnética nuclear. Estos metabolitos son responsables del color de la pulpa y también se relacionan con el potencial antioxidante y quelante de sus extractos. La presencia de compuestos antioxidantes, fibra dietética y carbohidratos no digeribles le confieren potencial nutracéutico

¹ Coordinación Académica Región Altiplano Oeste, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Carretera Salinas-Santo Domingo #200, C.P. 78600, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México. Autora de correspondencia: jmlm21@outlook.es, janet.leon@uaslp.mx.

² Unidad de Biotecnología Vegetal, CONAHCYT-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amealco, Carretera Amealco-Temascalcingo Km. 1, C.P. 76850, Amealco, Qro., México.

⁴ CONAHCYT / Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, Hornos 1003, Noche Buena, C.P. 71230, Santa Cruz Xoxocotlán, Oax., México.

a los frutos, cladodios o zumo de estas cactáceas. Y esto convierte a las cactáceas de estos tres géneros en una fuente de pigmentos naturales e ingredientes funcionales que pueden aprovecharse en la industria de los alimentos. Por ello, el objetivo de este capítulo es revisar la información bibliográfica actual (últimos cinco años) sobre la extracción e identificación de los metabolitos secundarios de las diferentes partes de las cactáceas de estos tres géneros, así como las actividades biológicas y el potencial nutracéutico de sus productos.

PALABRAS CLAVE: alimento funcional, betalainas, composición fitoquímica, compuestos fenólicos, *Hylocereus* spp., *Opuntia* spp., potencial nutracéutico, *Stenocereus* spp.

INTRODUCCIÓN

Las cactáceas (1 870 especies y 139 géneros) son endémicas del continente americano y han sido utilizadas por el ser humano como una fuente de alimento y medicina durante miles de años. Los cladodios y frutos son generalmente las partes comestibles de la planta, pero también se ha reportado el uso de tallos, brotes frescos y flores. En México, los frutos como la tuna (*Opuntia* spp.), la pitahaya (*Hylocereus* spp.) y la pitahaya (*Stenocereus* spp.) son aprovechados por comunidades de las zonas semiáridas. Su consumo es principalmente en fresco, pero también se elaboran diferentes productos alimenticios, como jugos y mermeladas.

Dependiendo de la especie y cultivar, varía la pigmentación de la pulpa (morada, roja, naranja, amarilla y blanca), lo cual está dado por el tipo y contenido de betalaínas (BT). Estos cromoalcaloides solubles en agua son los responsables del color amarillo-rojo de las flores y frutos de especies pertenecientes a trece familias del orden Caryophyllales. La atracción de polinizadores y dispersores de semillas, así como la protección contra especies reactivas de oxígeno generadas en condiciones de estrés, son algunas funciones en las plantas que se han sugerido para estos metabolitos secundarios (MS) como resultado de varios estudios. En diferentes modelos *in vitro* e *in vivo* también han mostrado diferentes actividades biológicas, así como antioxidante, quelante y antiinflamatoria. Además de la presencia de BT, otros compuestos bioactivos han sido identificados en diferentes partes del fruto, que junto con el contenido de fibra y minerales proporcionan beneficios para la salud humana. En este capítulo se hace una revisión bibliográfica de los MS identificados en las diferentes partes de las cactáceas de los géneros *Opuntia*, *Hylocereus* y *Stenocereus*, así como las actividades biológicas reportadas y su potencial nutracéutico.

USOS DE LAS CACTÁCEAS EN LA ALIMENTACIÓN Y MEDICINA TRADICIONAL DE MÉXICO

Las cactáceas pertenecen al orden Caryophyllales, donde comparten con otras familias la presencia de BT (Amaya *et al.*, 2019). Son plantas endémicas del continente americano, distribuidas principalmente en las zonas

áridas y semiáridas; las características ecológicas sobre la base de clima, topografía y suelos peculiares existentes en México lo ubican como el país que alberga la mayor cantidad de especies de la familia Cactaceae (Ramírez *et al.*, 2020). Existen alrededor de 35 especies con potencial por su uso alimenticio, como frutos u hortalizas, y medicinal, entre las que destacan los géneros *Ferocactus*, *Echinocactus*, *Selenicereus*, *Cereus*, *Leptocereus*, *Escontria*, *Myrtilloactos*, *Hylocereus*, *Stenocereus* y *Opuntia*.

Diversas fuentes bibliográficas testifican el uso de los tallos y frutos como fuente de alimento humano y medicinal, siendo éstos los usos más comunes que los antiguos pobladores de México dieron a las cactáceas hasta nuestros días (Ramírez *et al.*, 2020). Dentro del consumo alimenticio, los cladodios del género *Opuntia*, conocidos comúnmente como nopales, se consumen como verduras. México es considerado el centro de origen de *Opuntia*, además de ser uno de los géneros de mayor distribución y representativo de la familia Cactaceae (Ramírez *et al.*, 2020). El uso tradicional de *Opuntia* se remonta a épocas prehispánicas, documentadas en el Código Florentino del siglo XVI, en donde el cladodio de la planta era utilizado para el tratamiento de la gastritis, cólicos intestinales y úlceras (Argueta, 1994). Se consideró que los nopales determinaron en muchos casos la integración de núcleos de población humana, pues diferentes tribus errantes coincidían en la época de fructificación a las zonas habitadas por estas plantas y acababan por establecerse y fijar ahí su residencia (Ramírez *et al.*, 2020). En la actualidad, existen diversos estudios sobre la importancia nutraceutica y beneficios medicinales del género *Opuntia*, que incluyen el tratamiento de arteriosclerosis, diabetes, gastritis e hiperglucemia (Arias *et al.*, 2020; Díaz de León *et al.* 2020). Además, los frutos de nopal (tuna) tienen mucho valor comercial debido a sus excelentes propiedades nutricionales y su uso para la elaboración de productos alimenticios como jugos, bebidas alcohólicas, mermeladas y edulcorantes líquidos naturales.

Por otro lado, de las variantes de *Stenocereus stellatus* [Pfeiffer] Riccobono, conocidas coloquialmente en México como pitahaya, xoconostle dulce o tunillo, son consumidos sus frutos (Cervantes *et al.*, 2020). El género *Hylocereus* es el cactus trepador de mayor distribución en el mundo, se reconocen diecisiete especies conocidas como pitahaya roja (Ramírez *et al.*, 2020); mientras que la pitahaya amarilla, *Selenicereus*

spp., cuenta con veinte especies (Tel *et al.*, 2004). El uso principal de la pitahaya es alimenticio, sobre todo el fruto, el cual fue domesticado originalmente por las culturas precolombinas, quienes lo recolectaban para su alimentación y medicina. Aunque también se informa el consumo de las flores como legumbre y el de los brotes tiernos como hortaliza fresca (Le y Vaillant, 2011). Las semillas se emplean como prebióticos, por su contenido en oligosacáridos, las cuales pueden constituir un ingrediente importante en alimentos funcionales y productos nutracéuticos.

CONTENIDO DE FIBRA, PROTEÍNA, CARBOHIDRATOS Y MINERALES EN FRUTO, CLADODIO Y SEMILLA

El contenido nutricional de las partes comestibles de los géneros *Opuntia*, *Stenocereus* y *Hylocereus* es diverso, y la caracterización de las flores, la pulpa, la cáscara y las semillas sigue en estudio y es de gran interés debido a sus propiedades funcionales. En la mayoría de los géneros aquí mencionados, la cáscara y las semillas constituyen hasta el 60% del peso total de los frutos (Jiménez-Aguilar *et al.*, 2015). Por otro lado, el contenido nutricional varía de acuerdo con la especie, el órgano comestible, el grado de maduración y el manejo agronómico durante el ciclo del cultivo. Algunos de los principales compuestos que pueden dar origen a alimentos funcionales, al consumir estos géneros, son el contenido de fibra, la proteína, los carbohidratos y minerales.

Contenido de fibra

El consumo de fibra dietética se asocia con una reducción en el riesgo de desarrollar algunas enfermedades crónicas, principalmente con la reducción en los niveles de colesterol y glucosa en sangre, además de sus efectos laxantes (García-Amezquita *et al.*, 2018), lo que ha propiciado el consumo de productos de los tres géneros de cactáceas mencionadas aquí. En el fruto completo de *Opuntia* se encontró de 26.7 a 29.5% de fibra dietética total, dependiendo de la variedad (Arias *et al.*, 2020). En tanto, en otro estudio, donde se caracterizó la pulpa y la cáscara de las

tunas, el contenido de fibra dietética total fue 4.5 veces mayor en la cáscara que en la pulpa (García-Amezquita *et al.*, 2018). El contenido de fibra soluble e insoluble es drásticamente inferior en los cladodios, comparado con el fruto completo o la cáscara de la tuna, con valores alrededor de 0.2 y 0.14 g/100 g de peso seco (PS), respectivamente (Du Toit *et al.*, 2018).

Aunque se ha reconocido que las cactáceas son una fuente de fibra y que su consumo se asocia con beneficios para la salud, para el caso de los frutos de pitahaya (*Stenocereus* spp.) y pitahaya (*Hylocereus* spp.), los estudios de los últimos cinco años están centrados en el contenido de fibra cruda en la pulpa de los frutos con valores que van de 0.3 a 3.0 g/100 g de peso fresco (PF). Este rango es amplio debido a la diversidad de especies; sin embargo, de los estudios revisados, no existen diferencias grandes entre el contenido de fibra cruda en la pulpa de algunas especies de pitahaya y pitahaya, aunque sí se pueden encontrar amplias diferencias entre especies del mismo género. Debido a las características morfológicas, los frutos de pitahaya están siendo estudiados con mayor detalle y profundidad, encontrándose mayor contenido de fibra cruda en la cáscara (69.3 g/100 g PF) y semillas (30.2 g/100 g PF) comparado con la pulpa (2.2 g/100 g PF) (Jalgaonkar *et al.*, 2020).

Contenido de proteína

El contenido de proteína en el género *Opuntia* varía ampliamente entre especies, variedades y partes de los frutos; por ejemplo, en frutos completos de tuna se encontró 4.4 g/100 g PS (Arias *et al.*, 2020), mientras que en la pulpa y cáscara de tunas se indicó un contenido de 3.0 y 6.1 g/100 g PS, respectivamente (García-Amezquita *et al.*, 2018). En cladodios, el contenido de proteínas es de 3.2 g/100 g PS (Du Toit *et al.*, 2018), similar a la pulpa de la tuna, pero inferior a lo reportado en el fruto completo o en la cáscara de tuna.

En la pulpa de frutos de pitahaya, el contenido de proteína es de 1.2 a 1.7 g/100 g PF, sin gran variación entre las especies del género *Stenocereus*. Mientras que en pitahaya se encontró una mayor variación y un menor contenido de proteína en la pulpa (0.7 y 0.8 g/100 g PF) (Hernández-Ramos *et al.*, 2020; Verona-Ruiz *et al.*, 2020) y en la cáscara (0.8 g/100 PF)

(Jalgaonkar *et al.*, 2020), aunque se encontraron valores similares a los reportados en la pulpa de pitahaya (1.4 g/100 g PF) y superiores tanto en la pulpa (12.3 g/100 g PF) como en las semillas (20.6 g /100g PF) (Jalgaonkar *et al.*, 2020).

Contenido de carbohidratos totales

En el fruto completo de tuna, se reportó alrededor de 19.9 g/100 g PS de carbohidratos totales (Arias *et al.*, 2020). En otro estudio, se encontró un mayor contenido de carbohidratos totales tanto en pulpa como en cáscara comparado con el fruto completo de tuna (García-Amezquita *et al.*, 2018). En los cladodios, el contenido de carbohidratos (62.5 g/100 g PS) es superior a lo encontrado en la cáscara de la tuna, pero inferior a la pulpa del fruto. El contenido de carbohidratos en la pulpa de frutos frescos de pitahaya y pitahaya está en un intervalo de 8.0 a 13.6 g/100 g PF, donde el valor menor se encontró en pitahaya (Chuck *et al.*, 2016) y el valor superior en pitahaya (Ramírez *et al.*, 2020). En un estudio reciente, se reportó que la cáscara de pitahaya contiene alrededor del 50% (6.2 g/100 g PF) y las semillas tienen cerca de tres veces (35.2 g/100 g PF) más carbohidratos que la pulpa (11.3-13.6 g/100 g PF) de los frutos (Jalgaonkar *et al.*, 2020).

Contenido de minerales

Los cladodios del género *Opuntia* cuentan con un mayor número de reportes con respecto a su contenido de minerales. Aunque es importante valorar que la composición mineral varía de acuerdo con los factores edáficos del lugar donde crecen las cactáceas, la estación de año y la edad de la planta, los cladodios se caracterizan por tener un alto contenido de calcio (Ca), seguido de potasio (K) y magnesio (Mg) (Hernández-Vidal *et al.*, 2021), así como de otros nutrimentos como nitrógeno (N), fósforo (P), sodio (Na), entre otros (Du Toit *et al.*, 2018; Missaoui *et al.*, 2020). Mientras que en los frutos se encontró mayor contenido de K, comparado con el P, Ca o Mg (cuadro 1) (Ramírez *et al.*, 2020).

Los estudios actuales sobre la composición mineral de la pitahaya son escasos, a diferencia de los reportes encontrados en pitahaya o en el género *Opuntia*. En la pulpa de pitahaya y pitahaya, la concentración de P es mayor que la de Ca. Debido a la poca disponibilidad de información reciente, no se puede establecer la relación con otros micronutrientes, como el K y el Mg (cuadro 1). Con respecto a los micronutrientes, el hierro (Fe) es el elemento predominante comparado con el cobre (Cu) o el zinc (Zn), en los tres géneros de cactáceas.

Existe una amplia caracterización, que se remonta más allá de los últimos cinco años, sobre el contenido nutricional de los órganos que se consumen en fresco, como los cladodios, y frutos de los géneros *Opuntia*, *Stenocereus* y *Hylocereus*. En los últimos años, la investigación se ha volcado hacia el aprovechamiento de las partes no comestibles, como la cáscara de los frutos, que se pueden considerar como un subproducto, así como de otros frutos de cactáceas que se consideran desaprovechadas, para lo cual se están elaborando y caracterizando diferentes presentaciones de productos con alto valor nutricional, principalmente en el género *Opuntia*. Los estudios siguen centrados en la caracterización nutrimental de los frutos de pitahaya y pitahaya en fresco, y en su caracterización fitoquímica, debido sobre todo a la gran diversidad de especies y de colores de la pulpa de las pitahayas. Mientras que, en la pitahaya, los estudios se dirigen a la caracterización y valoración fitoquímica de la cáscara y las semillas de los frutos por su potencial nutracéutico (Jalgaonkar *et al.*, 2020).

CUADRO 1
CONTENIDO DE MINERALES EN ÓRGANOS COMESTIBLES DE LOS GÉNEROS
OPUNTIA, *STENOCEREUS* E *HYLOCEREUS*

Género	Parte de la planta	mg /g materia seca				Referencia
		P	K	Ca	Mg	
<i>Opuntia</i> spp.	Cladodios	2.86	32.06	38.45	13.65	Hernández-Vidal <i>et al.</i> , 2021.
	Cladodios	0.11	28.00	30.00	25.00	Du Toit <i>et al.</i> , 2018.
	Fruto	0.32	22.00	0.56	0.85	Ramírez <i>et al.</i> , 2020.
<i>Stenocereus</i> spp.	Fruto	0.36	0.11	0.09	0.24	García-Cruz <i>et al.</i> , 2013.
<i>Hylocereus</i> spp.	Fruto	0.15	—	0.05	—	Ramírez <i>et al.</i> , 2020.
	Fruto	0.19	2.94	0.08	0.33	Hernández-Ramos <i>et al.</i> , 2020.

METABOLITOS SECUNDARIOS COMO POTENCIALES COMPUESTOS BIOACTIVOS DE CACTÁCEAS

Los MS se caracterizan por ser moléculas orgánicas producidas por las plantas, comúnmente de bajo peso molecular, y claves en la interacción de la planta con su entorno (Delgoda y Murray, 2017). Las cactáceas, al crecer en un entorno árido, están expuestas a temperaturas extremas, alta radiación y baja humedad, por lo cual resulta interesante ahondar en el contenido y composición de sus compuestos bioactivos.

Esta sección se enfoca en los compuestos fenólicos (CF) y las BT, responsables del color de la pulpa y de la cáscara. Los frutos son la parte de la planta que ha sido más investigada en relación con el perfil de MS, debido a su pulpa de agradable sabor, características organolépticas atractivas y variedad de colores (blanca, amarilla, roja, morada). Dichos perfiles se han obtenido usando técnicas como cromatografía líquida de ultra eficiencia (UPLC) o de alta eficiencia (HPLC) con detector de arreglo de diodos (DAD) y acoplado a un espectrómetro de masas (EM) con ionización por electrospray (ESI) (HPLC-DAD ESI/EM), HPLC acoplado a un detector másico tipo cuadrupolo-tiempo de vuelo (QTOF), UPLC-QTOF-EM^E, cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-EM) y resonancia magnética nuclear de protones (¹H NMR), entre otros.

En los frutos del género *Stenocereus*, se caracterizó por medio de HPLC-DAD ESI/EM el perfil de CF y BT de dos ecotipos de la especie *S. pruinosus*, pulpa roja y naranja, y dos ecotipos de la especie *S. stellatus*, pulpa roja y blanca. La mayoría de los CF identificados corresponden a derivados del hidroxicinamoilo, flavanonas y flavonoles. Además de 11 BT, siendo mayor el contenido de betaxantinas (BX) que el de betacianinas (BC) para los tres ecotipos coloreados; donde predominan indicaxantina, gomfrenina I, filocactina, y sus isómeros. El contenido de fenoles totales y BT es mayor en las variantes rojas (García-Cruz *et al.* 2017).

Asimismo, en la pulpa de pitahaya de las especies *S. thurberi*, *S. stellatus* y *S. pruinosus* se identificaron los ácidos ferúlico, cafeico y cumárico, así como quercetina (Castro-Enríquez *et al.*, 2020), además de 7 BT en *S. griseus*, siendo la betanina e isobetanina las mayoritarias (>2.4 mg/g), y la betanidina, isobetanidina, neobetanina y 2-descarboxineobetanina, minoritarias. Sin embargo, estas últimas son más abundantes al reducir a 4 el

pH de los extractos, probablemente por la hidrólisis de la betanina e isobetanina, lo que resultó en un aumento de la intensidad del color púrpura (Cejudo *et al.* 2019). Para el género *Stenocereus*, es necesaria una cantidad mayor de estudios recientes enfocados no sólo en la cuantificación total, sino en la caracterización detallada de MS para los frutos: cáscara, semillas y pulpa; y otras partes de la planta, donde se tenga en cuenta metabolitos de los cuales aún no hay reportes, como lo son los CF no extraíbles.

El perfil de MS del género *Hylocereus* se analizó a través de diversas técnicas. Al-Mekhlafi *et al.* (2021) caracterizaron por medio de resonancia magnética nuclear de protones (^1H NMR) las variaciones entre los perfiles de dos extractos, metanol y metanol-agua, de siete cultivares israelitas de pitahaya. El extracto de metanol fue mejor para la extracción, pues presentó un contenido mayor de compuestos. Los autores lograron identificar 36 metabolitos, entre los que destacan ácidos orgánicos como fórmico, málico, cítrico, succínico, azelaico; flavonoides como rutina, catequina y derivados de quercetina; ácidos fenólicos como ácido cafeico; BT como hilocerenina, filocactina, betanina, 2-O-glucosilbetanina, 2-O-apiosilbetanina; aminoácidos, monosacáridos y ácidos grasos. Este tipo de perfiles sirven para propósitos de autenticación de los frutos, como ya se ha reportado para los cladodios de especies del género *Opuntia* (Astello *et al.*, 2015).

Por medio de un sistema HPLC-QTOF, Wu *et al.* (2019) evaluaron los cambios en el perfil de compuestos bioactivos, tanto en la cáscara como en la pulpa, de frutos de *H. polyrhizus* “Zihonglong” en nueve etapas de desarrollo. Durante el proceso de maduración, los frutos de pitahaya sufrieron la degradación de clorofilas y la biosíntesis de BT. La formación de éstas se dio gracias a la disminución de los aminoácidos y al aumento de monosacáridos, ácidos orgánicos, principalmente el ácido citramálico; y las monoaminas: tiramina y triptamina. Estos tres últimos metabolitos son clave en la síntesis de BT tanto en la cáscara como en la pulpa. Asimismo, se lograron identificar y cuantificar 65 y 51 metabolitos, respectivamente, de los cuales 10 MS fueron más abundantes en la pulpa que en la cáscara: ácido betalámico, quercetina 3-O-rutinósido, vebonol, sespéndol, vapiprost, ciclo-5-O-glucósido, betanina, isobetanina, filocactina e hilocerenina. Los últimos cuatro compuestos fueron detectados a partir del día veintiséis después de la floración y se

incrementaron durante la maduración de los frutos; durante este periodo, también se presentó una disminución del ácido betalámico, pues sufre reacciones de condensación con aminoácidos o aminas para la formación de BX. En las nueve etapas de desarrollo, la cáscara presentó un mayor contenido de BX (amarillo) que de BC (rojo-violeta); la pulpa presentó un comportamiento contrario (Wu *et al.* 2019).

La caracterización de la cáscara y la pulpa de *H. polyrhizus* (F.A.C. Weber) Britton & Rose, se llevó a cabo por UPLC-QTOF-EM^E, e identificaron dieciséis y quince compuestos, respectivamente. Estos metabolitos fueron sobre todo isómeros de filocactinas y de betaninas, flavonoides, y carbohidratos como maltotriosa y maltotetrosa que son característicos de las especies de *Hylocereus* (Lira *et al.*, 2020). En total se identificaron 69 BT, tanto de la fruta, pulpa y el jugo (Ibrahim *et al.*, 2018). En lo que respecta a metabolitos volátiles, por medio de un análisis GC-EM se identificaron ochenta compuestos en la pulpa, donde resalta la presencia de alcoholes, aldehídos, cetonas, hidrocarburos, éteres, ésteres y ácidos carboxílicos (Santos *et al.*, 2020). Pero no sólo se ha caracterizado la fruta, en el extracto metanólico del tallo de *H. polyrhizus* se encontró terpinoleno, eucaliptol, β -selineno y 5-cedranona (Ismail *et al.*, 2017).

En lo relacionado con el género *Opuntia*, se han caracterizado las flores, la fruta entera, la pulpa, las semillas, la cáscara, los cladodios y los tallos (Aruwa *et al.*, 2018). En el caso de las tunas, se reportó la presencia de flavonoides, como catequina, isoramnetina, kaemferol, luteolina, miricetina, quercetina, rutina; ácidos fenólicos, como clorogénico, cafeico, cinámico, cumárico, ferúlico, hidroxibenzoico, protocatecuico, siríngico, vanílico y piscídico. BT, como betanidina, betanina, betaxantina, indicaxantina, isobetanina, neobetanina, filocactina, vulgaxantina y portulacaxantina. Lignanós, como americanol, furofurano, ácido isoamericanoico, isoamericanoina, pinosinol, isoprincepina y princepina; y esteroides, como campesterol, sitosterol, estigmasterol, fucosterol y schottenol (Ramírez *et al.*, 2020).

El perfil de compuestos bioactivos varía dependiendo de la coloración de las tunas. Amaya *et al.* (2019) llevaron a cabo una caracterización detallada de los compuestos bioactivos de la cáscara de tres cultivares de tuna: cristalina (verde), selección 2-1-62 (amarillo-naranja) y roja lisa (roja). Mediante UPLC-ESI-QTOF EM^E identificaron 145 metabolitos: 68

polifenoles extraíbles (1 flavanol, 2 flavanonas, 29 flavonoles, 17 ácidos hidroxibenzoicos y 19 ácidos hidroxicinámicos), 15 polifenoles hidrolizables (9 ácidos fenólicos y 6 flavonoides), 41 BT (23 BX, 18 BC), 16 carotenoides y 5 fitoesteroles. Cada cultivar presentó sus particularidades; las betacianinas sólo se identificaron en la variedad roja lisa; además, en comparación con los otros cultivares, se detectaron principalmente carotenoides, BX y fitoesteroles (neoxantina, flavoxantina, ácido γ -aminobutírico, fucosterol, sitosteril β -D-glucósido). En cristalina, fueron notables los polifenoles extraíbles (kaemferol 3-O-glucósido, ácido ferúlico y benzoico); y en cristalina y selección, los polifenoles hidrolizables (ácido gálico 3-O-galato, ácido cinámico, hesperidina, miricetina 3-O-ramnósido). Éste es el primer reporte que contiene información sobre el contenido de CF no extraíbles de la tuna, y de éstos se identificaron por primera vez nueve glucósidos de kaemferol y seis glucósidos de quercetina. Estos compuestos resultan relevantes porque llegan intactos al colon, donde son metabolizados por bacterias, que producen postbióticos con efectos benéficos para la salud.

Adicionalmente, en esta investigación identificaron por primera vez en la cáscara de tuna doce BC, entre las que destacan 2,15,17-tridescarboxi-betanina, 15-d Descarboxi-betanina, ácido betalámico, isofilocactina, 17-d Descarboxi-neobetanina, 2-d Descarboxi-betanina y gomfrenina II y III; y 16 BX, que involucran aminoácidos/monoaminas en su estructura, como BX-arginina, BX-ácido aspártico, BX-lisina, BX-prolina, BX-serina, BX-tiramina y BX-treonina. Entre los carotenoides identificados por primera vez, están bixina, norbixina, fisalieno, flavoxantina, cantaxantina y astaxantina (Amaya *et al.*, 2019).

En un extracto hidroalcohólico de cladodios provenientes de una región italiana, por medio de un análisis UHPLC-ESI/QTOF, se identificaron 89 flavonoides (flavonoles, flavanonas, flavonas, isoflavonoides, flavonoles,), 54 ácidos fenólicos (ácidos hidroxibenzoicos e hidroxicinámicos), 27 equivalentes de tirosoles, 14 lignanos, 17 alquilfenoles y derivados de estilbenos (Rocchetti *et al.*, 2018). Éste es el perfil más extenso de cladodios de nopal hasta el momento y provee información básica sobre la presencia de compuestos bioactivos.

De manera general, Pérez *et al.* (2016), al analizar frutos de treinta especies de los géneros *Opuntia*, *Hylocereus* y *Stenocereus* de diferentes

países, los clasificaron como una fuente pobre, buena y excelente de BT totales, BX y BC. Las especies rojas mexicanas *S. pruinosus* y *O. robusta* presentaron los mayores contenidos de BT (> 6 mg/g) y BC, junto con la variedad roja española *O. stricta* (> 2.8 mg/g). Las variedades mexicanas *S. pruinosus* roja y amarilla presentaron el mayor contenido de BX (> 3.1 mg/g). Lo anterior resalta a los frutos mexicanos como una excelente fuente de estos pigmentos.

En general, los frutos de los géneros *Stenocereus*, *Hylocereus* y *Opuntia* contienen una amplia gama de compuestos bioactivos, especialmente BT y CF. Sin embargo, su contenido y perfil se expresan de manera diferencial dependiendo de la parte de la planta, la etapa de crecimiento, las condiciones ambientales y la especie de la que se trate. Es así como la pulpa, y en algunos casos los subproductos del fruto (cáscara y semillas), resultan ser materiales promisorios como ingredientes funcionales, especialmente colorantes, para el desarrollo de nuevos productos tanto en la industria de alimentos como cosmética. Esto representa una alternativa de uso para estos materiales infrautilizados e infravalorados, y una oportunidad económica para los productores de las zonas áridas y semiáridas.

TECNOLOGÍAS DE EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS DE CACTÁCEAS

La pulpa de los frutos de las cactáceas de los géneros *Opuntia*, *Hylocereus* y *Stenocereus* es aprovechada para su consumo en fresco o para la obtención de mermeladas y otros productos después de su procesamiento. Como resultado de esta industrialización, se genera una gran cantidad de subproductos (semillas y cáscara) que pueden aprovecharse por su contenido de compuestos bioactivos. Por lo general, la extracción de estos compuestos se lleva a cabo después del secado del material vegetal, el cual se realiza a temperatura ambiente, en horno o por liofilización. Sin embargo, también se ha analizado el contenido de compuestos bioactivos en la pulpa fresca, la cual puede ser procesada con o sin semillas (cuadro 2).

Las semillas secas de *Opuntia stricta* han sido aprovechadas para la extracción de aceite y el rendimiento que se obtiene con la tradicional maceración con hexano (Hx, 49%) es similar al obtenido en la extracción

con fluidos supercríticos (CO₂), pero con una variación en la composición de ácidos grasos del aceite. El tiempo de extracción de los CF presentes en este aceite se puede reducir con la combinación de maceración con metanol (MeOH 80%) en agitación vigorosa y sonicación (Koubaa *et al.*, 2016).

Las investigaciones recientes sobre compuestos bioactivos se han enfocado principalmente en la extracción de CF y BT de la cáscara o pulpa de los frutos, y en menor proporción de tallo, hojas y productos procesados (cuadro 2). Otros compuestos bioactivos explorados son flavonoides y carotenoides. Las técnicas más utilizadas para la extracción de estos compuestos a partir de la cáscara es la maceración, mientras que, en el caso de la pulpa, es la infusión. La proporción tejido vegetal:disolvente (p/v) utilizada en algunos estudios va de 1:1.6 a 1:150, mientras que en la mayoría ha sido 1:10-1:20 (cuadro 2), siendo este factor importante para la eficiencia en la extracción de MS.

CUADRO 2
MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS DE ESPECIES
DE LOS GÉNEROS *OPUNTIA*, *HYLOCEREUS* Y *STENOCEREUS*

Compuestos bioactivos	Especie	Parte de la planta	Método de extracción	Referencia
1) Polifenoles (PF) extraíbles, 2) PF no extraíbles, 3) PF hidrolizables	<i>Opuntia ficus-indica</i>	Cáscara seca	Maceración	Amaya <i>et al.</i> , 2019.
Betalainas	7 especies de <i>Opuntia</i>	Pulpa fresca	Maceración	Aparicio <i>et al.</i> , 2017.
Compuestos fenólicos, Flavonoides, Betalainas	<i>Stenocereus stellatus</i>	Pulpa seca	Infusión	Cervantes <i>et al.</i> , 2020.
1) Betalainas, ácido ascórbico y compuestos fenólicos. 2) Carotenoides	<i>O. ficus-indica</i> , <i>O. robusta</i>	Cáscara fresca y seca, en jugo y conserva	1) Infusión. 2) Maceración	De Wit <i>et al.</i> , 2020.
Betalainas	<i>S. pruinosus</i> , <i>S. stellatus</i>	Pulpa	EAU	García-Cruz <i>et al.</i> , 2017.

CUADRO 2
MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS DE ESPECIES
DE LOS GÉNEROS *OPUNTIA*, *HYLOCEREUS* Y *STENOCEREUS* (continuación)

Compuestos bioactivos	Especie	Parte de la planta	Método de extracción	Referencia
Compuestos fenólicos totales, Betalaínas	<i>O. ficus-indica</i> , <i>O. engelmannii</i>	Cáscara seca	Maceración	Melgar <i>et al.</i> , 2017.
Compuestos fenólicos totales, Betalaínas	<i>S. stellatus</i>	Pulpa con/sin semillas fresca	Infusión	Pérez <i>et al.</i> , 2017.
Compuestos fenólicos totales	<i>O. ficus-indica</i>	Cáscara seca	Soxhlet, EAU	Karunanithi y Venkatachalam, 2019.
Compuestos fenólicos totales	<i>H. polyrhizus</i>	Cáscara seca	EAM	Nazeri y Zain, 2018.
Compuestos fenólicos totales y betalaínas	<i>H. undatus</i> , <i>H. megalanthus</i>	Cáscara seca	EAM	Ferreres <i>et al.</i> , 2017.
Compuestos fenólicos totales	<i>H. undatus</i>	Cáscara y hojas secas	Maceración	Som <i>et al.</i> , 2019.
Ácidos fenólicos y flavonoides	<i>H. polyrhizus</i>	Cáscara seca	Reflujo	Vijayakumar <i>et al.</i> , 2020.
Compuestos fenólicos totales	<i>H. polyrhizus</i>	Cáscara seca	Infusión	Manihuruk <i>et al.</i> , 2017.
Compuestos fenólicos y flavonoides totales	<i>H. costaricensis</i>	Tallo, cáscara y pulpa seca	Reflujo	Fidrianny <i>et al.</i> , 2017.
1) Aceite esencial, 2) Compuestos fenólicos del aceite esencial	<i>O. stricta</i>	Semillas secas	1) Maceración, Extracción por fluidos supercríticos. 2) Maceración. Sonicación	Koubaa <i>et al.</i> , 2016.

EAU-Extracción asistida por ultrasonido, EAM-Extracción asistida por microondas.

El contenido de compuestos bioactivos también varía dependiendo de la especie y variedad estudiada. La obtención de BT por maceración con etanol (EtOH 80%) a partir de la pulpa de dieciséis variedades de ocho especies de *Opuntia* reveló que las variedades de *O. ficus-indica* L. Mill presentan mayor contenido de BX que de BC, mientras que las dos variedades con el contenido más alto de BT fueron de la especie *O. ictérica*, donde predominan las BC (Aparicio *et al.*, 2017). Comparando los extractos acuosos de pulpa liofilizada de *S. stellatus*, los contenidos totales de CF, flavonoides y BT más altos se obtuvieron a partir del fenotipo rojo (Cervantes *et al.*, 2020). En esta misma especie, el extracto acuoso obtenido a partir de la pulpa sin semillas presentó el mayor contenido de compuestos bioactivos, y la aplicación de tratamientos previos a la extracción ayudó a mejorar los rendimientos, debido a que facilitan la liberación de los compuestos bioactivos de la matriz vegetal. El pretratamiento con ultrasonido (15 min) incrementa la extracción de BT en 13.1%, mientras que la aplicación de pectinasa (0.5%, 2h) aumenta el contenido de CF totales en el extracto (Pérez *et al.*, 2017).

Para la obtención de compuestos bioactivos de la cáscara, se realizan maceraciones alcohólicas (MeOH, EtOH y butanol-BuOH), hidroalcohólicas o acuosas, que en algunos casos son acidificadas con HCl, H₂SO₄ o TFA, lo cual puede influir en el contenido y tipo de compuestos que se obtienen. En especies del género *Opuntia* (*O. ficus-indica* var. *gialla*, *O. ficus-indica* var. *sanguigna* y *O. engelmannii* Salm-Dyck ex Engelm.), se han identificado doce diferentes CF extraídos con una mezcla hidroetanólica (80%), así como los ácidos piscídico y eucómico, y derivados de la isoramnetina, quercetina y kaemferol. El extracto de *O. engelmannii* muestra mayor contenido de CF y BC, mientras que los extractos de las dos variedades de *O. ficus-indica* tienen mayor contenido de BX (Melgar *et al.*, 2017). En las variedades roja lisa, selección 2-1-62 y cristalina de *O. ficus-indica* se extrajeron por maceración con diferentes disolventes los polifenoles extraíbles, no extraíbles e hidrolizables; estos dos últimos, en condiciones ácidas y con aplicación de calor (cuadro 2). De los tres cultivares, cristalina y selección son una buena fuente de polifenoles no extraíbles e hidrolizables. El cultivar cristalina también presenta el mayor contenido de CF totales y el 25% de sus polifenoles extraíbles son flavonoides, mientras que en el cultivar selección este porcentaje es más alto

(35%) (Amaya *et al.*, 2019). La extracción de CF también se ha realizado con agua acidificada en la especie *H. polyrhizus*, además de detectarse la presencia de flavonoides, hidroquinonas, terpenos y taninos (Manihuruk *et al.*, 2017). El uso de agua como disolvente favorece su aplicación en la industria de los alimentos al eliminar la presencia de residuos tóxicos en los extractos. Los extractos acuosos de cáscara de frutos de cuatro cultivares de *O. ficus-indica* y un cultivar de *O. robusta* son una buena fuente de ácido ascórbico, cuyo contenido disminuye cuando la cáscara es procesada (jugo o conserva). El cv. *Robusta* de *O. robusta* presentó el contenido más alto de BT en todas las presentaciones, mientras que la máxima extracción de CF (extracto acuoso) y carotenos (extracto Hx) en todos los cultivares se obtuvo a partir de la cáscara seca (De Wit *et al.*, 2020).

Algunos estudios confirman que la cáscara es una mejor fuente de compuestos bioactivos comparado con otras partes de la planta. En la especie *H. undatus* (Haw.) Britton & Rose, el contenido de CF de la cáscara es mayor al encontrado en hojas. Y comparando el disolvente de extracción, el contenido en el extracto MeOH fue más alto que en el extracto de cloroformo (CHCl₃), para ambos tejidos (Som *et al.*, 2019). De forma similar, el contenido de CF y flavonoides en la cáscara de *H. costarricensis* (F.A.C.Weber) Britton & Rose fue mayor que en tallos y pulpa, siendo los extractos de acetato de etilo (AcOEt) obtenidos mediante reflujo los que presentaron los contenidos más altos, comparado con Hx y EtOH (Fidrianny *et al.*, 2017). En el extracto MeOH, 80% de *H. polyrhizus* obtenido por reflujo se identificaron a los ácidos gálico y sinápico, quercimeritrina y glucósidos de quercetina, kaemferol y malvidina, además se confirmó la presencia de rutina (Vijayakumar *et al.*, 2020).

Dos alternativas para la maceración relativamente nuevas son la extracción asistida por ultrasonido (EAU) y por microondas (EAM), que tienen como ventajas una mayor eficiencia de extracción, menor consumo de disolventes y tiempos de extracción más cortos. Con la optimización de las variables de temperatura, tiempo de sonicación y proporción tejido/disolvente en la EAU a partir de cáscara de *O. ficus-indica*, se obtuvo concentraciones similares de CF y flavonoides totales (5.95 mg GAE/g y 9.79 mg RUE/g) comparadas con las obtenidas por extracción soxhlet (7.58 mg GAE/g y 10.931 mg RUE/g) con una reducción en el tiempo de extracción de 6h (soxhlet) a 17 min (EAU). Además, el perfil por GC-EM

muestra la ausencia de algunos compuestos bioactivos en el extracto obtenido por soxhlet, extraídos por EAU, lo cual puede deberse a la exposición a una temperatura alta por un tiempo prolongado (Karunanithi y Venkatchalam, 2019). El contenido de BX fue mayor que de BC en la pulpa de dos ecotipos de *S. pruinosus* y uno de *S. stellatus*, extraídas con MeOH acidificado por EAU. La gomfrenina I, indicaxantina y filocactina fueron las BT mayoritarias en los tres extractos; mientras que los derivados del ácido cafeico, el ácido p-cumarilquínico y la quercetina 3-O-rutinósido estuvieron presentes en los cuatro ecotipos (García-Cruz *et al.*, 2017). Varios factores pueden afectar la eficiencia de extracción en EAM, por lo que se han evaluado diferentes condiciones para optimizar la extracción de CF y BT a partir de la cáscara. El mayor rendimiento de extracción de CF totales en una EAM con agua a partir de cáscaras de *H. polyrhizus* se obtuvo usando una proporción 1:42 (p/v), a 400 W y 45°C durante 20 min (Nazeri y Zain, 2018). El rendimiento de extracción por EAM en *H. megalanthus* (K. Schumann ex Vaupel) Ralf Bauer y *H. undatus* (Haw.) Britton & Rose también es influido por la relación tejido vegetal/disolvente, obteniendo valores entre 5-21% en el extracto acuoso de cáscara. Para maximizar la extracción de BC, se requieren periodos cortos de extracción a una temperatura baja (< 50°C), siendo la betanina y la filocactina las que predominan en el extracto de *H. undatus*. El contenido de CF no se ve afectado por ninguno de estos parámetros (Ferrerres *et al.*, 2017).

PROPIEDADES BIOLÓGICAS Y FARMACOLÓGICAS DE FITOQUÍMICOS DE CACTÁCEAS

Los extractos de los géneros *Opuntia*, *Hylocereus* y *Stenocereus* han mostrado diversas actividades biológicas, algunas con potencial aplicación en la salud humana, que se correlacionan con el contenido de ácidos fenólicos, carotenoides, BT y flavonoides.

Actividad antioxidante

El potencial antioxidante de los MS ha sido ampliamente estudiado, lo cual permite que puedan ser usados como sustitutos de aditivos químicos

en alimentos y como ingredientes funcionales por sus beneficios para la salud, especialmente en enfermedades con base inflamatoria. En un análisis de diferentes cv. de *O. ficus-indica* y *O. robusta*, los productos (cáscara fresca, seca, chatni, jugo, conserva) a base de frutos morados (cv. *Robusta*) presentan el mayor porcentaje de actividad antioxidante y quelante, así como el mayor contenido de CF, BT y carotenos. En cambio, el compuesto antioxidante mayoritario en los frutos rojos (cv. *Meyers*) y naranjas (cv. *Gymno-carpo* y *Ofer*) fue el ácido ascórbico, el cual se correlacionó con la actividad quelante, mientras que la captación de radicales libres tiene una correlación fuerte con el contenido de carotenos y CF (De Wit *et al.*, 2020). Por otra parte, el extracto hidroetanólico de la cáscara de frutos de *O. engelmannii* presenta mejor actividad antioxidante que los extractos de *O. ficus-indica* var. *sanguigna* y *gialla*, con valores de EC₅₀ de 1.08-1.96 mg/ml en los ensayos de DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazina), inhibición del blanqueamiento de β-caroteno y poder reductor. Además, se reportó una alta correlación de la actividad antioxidante con el contenido de BC y CF, siendo la betanina y la isoramnetina-O-deoxihexosil-hexósido los componentes mayoritarios (Melgar *et al.*, 2017). En contraste, la actividad antioxidante del aceite de la semilla de *O. stricta* var. *haworth*, obtenido por fluidos supercríticos, presenta mayor contenido de CF, pero menor actividad antioxidante (IC₅₀ 10 µg/ml), comparado con el extracto hexánico (IC₅₀ 9 µg/ml) (Koubaa *et al.*, 2016). Oniszczuk *et al.* (2020) demostraron que la adición de 15% de pulpa seca (amarilla y naranja) de *O. ficus-indica* a una pasta hecha con harina de arroz y frijol (2:1, p/p) incrementa el porcentaje de captación del radical libre DPPH·, de 83 a 97%. La mayor capacidad antioxidante también se relaciona con un mayor contenido de ácidos fenólicos, así como protocatecuico, benzoico, gentísico, p-cumárico, ferúlico, isoferúlico y 3,4-dimetoxicinámico (Oniszczuk *et al.*, 2020). La actividad antioxidante de los extractos de pulpa de *O. ficus-barbarica* A. Berger y *O. robusta* fueron similares, siendo los extractos Hx con la IC₅₀ más baja en el ensayo de blanqueamiento del β-caroteno, y los extractos AcOEt los que presentaron mejor actividad en los ensayos de captación del DPPH· y ABTS⁺ (2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico), en la primera con valores de SC₅₀ similares a los controles (69.32 y 67.57 µg/ml) (Kivrak *et al.*, 2018).

En el género *Stenocereus*, los ecotipos de frutos rojos de las especies *S. pruinosus* y *S. stellatus* presentan mayor capacidad antioxidante que

los frutos naranjas y blancos, y se muestra una correlación positiva con el contenido de BT pero no con el contenido de CF. Las BX (indicaxantina e isoindicaxantina) se encontraron en mayor proporción comparado con las BC en todos los ecotipos (García-Cruz *et al.*, 2017). En contraste, en frutos de *S. stellatus* colectados en Oaxaca, México, no se observan diferencias en la capacidad antioxidante con el color de la pulpa (blanco, naranja, rojo y púrpura), usando el mismo método de ABTS⁺ (Cervantes *et al.*, 2020). También se ha reportado que la capacidad antioxidante de la pulpa disminuye cuando la extracción se realiza con semillas y el pretratamiento de la pulpa sin semilla antes de la extracción también tiene una influencia negativa en el caso del ultrasonido, mientras que el tratamiento con proteasas y pectinasas (2 h) tiene una influencia positiva, además que favorecen la extracción de CF (Pérez *et al.*, 2017).

En el género *Hylocereus*, los extractos EtOH de tallo y cáscara de *H. costaricensis* presentan la actividad antioxidante más alta con una IC₅₀ 3.56 y 1.55 µg/ml por los métodos de DPPH· y ABTS⁺, respectivamente. Sin embargo, no se encontró una correlación de esta actividad con el contenido de CF y flavonoides totales (Fidrianny *et al.*, 2017). En el extracto acuoso de *H. polyrrhizus*, se registró una capacidad antioxidante menor (IC₅₀ de 0.52 mg/ml) por el método de DPPH·, con un contenido de CF de 5.80 mg/GAE g de extracto (Nazeri y Zain, 2018). Sin embargo, la cáscara de frutos de esta especie muestra un potencial antioxidante fuerte al extraer con EtOH al 82%, con valores de IC₅₀ de 36.39 (método ABTS⁺) y 21.93 µg/ml (método del fosfomolibdeno) (Vijayakumar *et al.*, 2020). En el extracto MeOH del follaje y la cáscara de frutos de *H. undatus* se registra la actividad antioxidante más alta y el mayor contenido de CF comparado con los extractos CHCl₃ (Som *et al.*, 2019).

Actividad antimicrobiana

En la cáscara de especies de *Opuntia*, se ha comprobado que hay compuestos con propiedad antimicrobiana. Los extractos hidroetanólicos de *O. ficus indica* y *O. engelmannii* presentaron actividad antibacteriana contra *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Enterobacter cloacae*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Salmonella typhimurium*.

También inhiben el crecimiento de varias especies de hongos de los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*, siendo más activos que el cetoconazol contra *A. ochraceus*, *P. funiculosum*, *P. ochrochloron* y *Trichoderma viride* (Melgar *et al.*, 2017). De forma similar, el extracto enriquecido en CF obtenido a partir del aceite de semillas de *O. stricta* inhibió el crecimiento de bacterias gram positivas (*B. subtilis*, *E. faecalis*, *B. thuringiensis* y *Klebsiella pneumoniae*) y gram negativas (*Escherichia coli*, *S. typhimurium* y *Enterobacter* sp.) (Koubaa *et al.*, 2016).

Efecto antihiper glucémico

El pitayo tunillo (*S. stellatus*) es una cactácea nativa de México que presenta en su pulpa variantes blancas, púrpuras, rojas y naranjas. De estas dos últimas, se ha reportado su efecto antihiper glucémico, al evaluarse en un test de tolerancia a la glucosa en ratas sanas. Este efecto estuvo correlacionado con el contenido de flavonoides, BT, y su capacidad antioxidante (Cervantes *et al.* 2020). El consumo de las semillas de *S. stellatus*, de las coloraciones blanca y roja, disminuyó el aumento de glucosa en sangre después de una carga oral de glucosa en ratas sanas (Díaz de León *et al.* 2020). Tanto la pulpa como las semillas son prometedoras como ingredientes con potencial para reducir los niveles de glucosa en sangre en personas con desórdenes en el metabolismo de carbohidratos.

Efecto antiobesogénico

Para la pitahaya (*H. undatus*) también se han reportado beneficios para la salud; por ejemplo, el consumo de jugo de pitahaya blanca durante catorce semanas en ratones obesos redujo las alteraciones metabólicas producidas por el consumo de una dieta alta en grasa: lipopolisacáridos en suero (endotoxemia), resistencia a la insulina, esteatosis hepática e hipertrofia del tejido adiposo. Estos efectos deseables fueron causados por la modulación de genes involucrados en el metabolismo de ácidos grasos (Cpt1b, LPL y Srebp1), en la biosíntesis del colesterol (HMGCoR, Insig1 e Insig2) y el aumento en la expresión de genes relacionados con

el factor de crecimiento fibroblástico 21 (FGF21) que contrarrestan los efectos de la diabetes: Klf, FGFR2, Egr1 y cFos (Song *et al.*, 2016).

El consumo del polvo de cáscara de pitahaya roja (*H. polyrhizus*), en ratones hiperlipidémicos, presentó potencial para mejorar los parámetros en suero, al disminuir los valores de colesterol total, triglicéridos y lipoproteínas de baja densidad (LDL-c) y aumentar los niveles de lipoproteínas de alta densidad (HDL-c). Este efecto puede deberse al contenido de fibra dietaria (63.9%) y compuestos antioxidantes de la cáscara (Hernawati *et al.* 2018). Por otro lado, las betacianinas presentes en la cáscara tienen la capacidad de reducir la ganancia de peso, la hipertrofia del tejido adiposo y la hepatoesteatosis, y de disminuir la intolerancia a la glucosa y la resistencia a la insulina en ratones obesos. El efecto protector se debe a que estos compuestos inducen la oxidación de lípidos, disminuyen la síntesis de ácidos grasos y reducen la resistencia a FGF21 (Song *et al.*, 2016).

El género *Opuntia* tiene efecto benéfico sobre las condiciones del síndrome metabólico (SM). Personas con uno o dos criterios de SM consumieron durante un mes pasta adicionada con el extracto de cladodios de *O. ficus-indica* (figura 1). Los parámetros de circunferencia de cintura, glucosa, triglicéridos, urea, creatinina, aspartato transaminasa, y las partículas LDL pequeñas y densas, redujeron significativamente (Giglio *et al.* 2020). Además, el consumo de cladodios de nopal mejoró anomalías relacionadas con la obesidad como la reducción de la endotoxemia metabólica, la esteatosis hepática, el estrés oxidativo en tejido adiposo y cerebro, y la modulación de la microbiota intestinal en ratas obesas (Sánchez *et al.*, 2017).

Actividad antiinflamatoria

La corteza de *H. polyrhizus* demostró tener efecto antiinflamatorio, al disminuir los niveles de interleucina-1 β (IL-1 β), la expresión del factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF) y la endometriosis mediante la reducción de la actividad del factor de transcripción nuclear kappa B (NF- κ B) en ratones (Eka *et al.*, 2017). El extracto metanólico de las flores de *O. ficus-indica* presentó efecto antiinflamatorio en un modelo

de edema de pata de rata, al reducir los niveles de malondialdehído y aumentar el glutatión reducido y las actividades de catalasa y superóxido dismutasa (Ammar *et al.*, 2018). Este efecto también se demostró en sujetos sanos suplementados con tuna (*O. ficus-indica*), al modular biomarcadores inflamatorios como TNF- α , IL-1 β INF- γ , IL-8, PCR y la tasa de eritrosedimentación e incrementar marcadores antiinflamatorios como IL-10 (Attanzio *et al.*, 2018).

Otras propiedades biológicas y farmacológicas

El consumo de la piel y pulpa de pitahaya (*H. polyribus*) presentó un efecto ansiolítico en peces cebra mediante la activación del sistema GABA-érgico, identificando maltotriosa, quercetina-3-O-hexósido, apiosil-malonil-betanina y 6'-O-malonil-2-descarboxi-betanina en el fruto (Lira *et al.*, 2020). Asimismo, el jugo de pitahaya roja previene la anemia en mujeres embarazadas, al tener un efecto sobre los niveles de hemoglobina y eritrocitos (Widyaningsih *et al.*, 2017); esto se debe a que el fruto es rico en hierro (2-7 mg de hierro/kg de fruto seco), un componente principal de la hemoglobina. Además, se ha reportado el efecto cicatrizante tras la aplicación de extracto acuoso de *H. undatus* y de una pomada adicionada con dicho extracto, debido a que incrementó la formación de tejido conectivo en heridas en las áreas externas de la piel de ratones. Este efecto también puede estar relacionado con la actividad antiinflamatoria y antibacteriana del extracto (Montadher *et al.*, 2018).

POTENCIAL NUTRACÉUTICO DE LOS PRODUCTOS ALIMENTICIOS ELABORADOS CON CACTÁCEAS

El potencial nutracéutico de las cactáceas está dado, entre otros, por su alto contenido de BT, fibra dietética y compuestos antioxidantes. Especies del género *Opuntia* producen cladodios (la parte tierna del tallo del cactus), frecuentemente consumidos como verduras y frutos. En los estudios realizados con los cladodios, se ha encontrado un efecto hipolipemiante tras disminuir los niveles de las lipoproteínas de baja densidad

(LDL-c) (Giglio *et al.*, 2020), así como un efecto antihiper glucemiante, ya que evita los picos posprandiales de glucosa (Díaz de León *et al.*, 2020). Además, el nopal puede ser considerado como un prebiótico, ya que su composición de carbohidratos no digeribles induce el crecimiento de microorganismos que contribuyen al bienestar del huésped (Sánchez *et al.*, 2017). Los cladodios son una fuente rica en minerales, principalmente de Ca, y se ha relacionado el estado de madurez de los cladodios con diferentes efectos en el sistema óseo de las ratas durante su fase de crecimiento. Los mejores hallazgos se encontraron con un peso promedio de 500 g, ya que el Ca contenido en los cladodios estuvo más biodisponible y fue capaz de mejorar la densidad mineral y las propiedades mecánicas y microestructurales de los huesos de las ratas (Hernández-Becerra *et al.*, 2017). Por ello, el incluir el consumo de cladodios en la dieta podría beneficiar la salud ósea. Sin embargo, es necesario realizar más estudios para evaluar el efecto de consumir cladodios de *O. ficus-indica* en el sistema óseo de los seres humanos.

Estudios realizados con el polvo de frutos enteros de las especies llamadas xoconostles (*O. joconostle* Web. y *O. matudae* Scheinvar) mostraron que debido a su contenido en fibra y antioxidantes ejercen un efecto hipoglucemínico y anticolesterolémico (Arias *et al.*, 2020). Las tunas (*Opuntia*) también tienen un gran contenido de CF y un alto potencial antioxidante, por lo que se ha sugerido su uso como aditivo alimenticio en una mezcla con pasta sin gluten, que incluye arroz, frijoles y la adición de 15% de tunas. Esta pasta suplementada con tunas constituye una fuente de antioxidantes naturales y puede ayudar a mejorar la salud y calidad de vida de los consumidores celíacos (Oniszczyk *et al.*, 2020). El zumo de tuna es considerado una fuente de pigmentos BX que pueden ser aprovechados como colorante amarillo natural para uso alimenticio. Mediante una microencapsulación por secado por absorción, se obtuvo un polvo evaluado como colorante en un yogurt y un refresco. En estos dos modelos alimenticios se presentó un color amarillo natural con buena estabilidad, el cual tiene una alta demanda en la industria de los alimentos y las bebidas, en donde las BX de tuna representan un pigmento prometedor con efectos antioxidantes para sustituir los colorantes sintéticos (Fernández *et al.*, 2018).

También se ha sugerido el uso de la cáscara de tuna (*O. ficus-indica*) como ingrediente funcional, en forma de harina vegetal para la

elaboración de pan, por su contenido de fibra y compuestos bioactivos (flavonoides y BT) con alta capacidad antioxidante. La mejor formulación de pan fue la que contuvo 10% de harina de cáscara de tuna ya que tuvo las mejores características nutricionales y sensoriales (Parafati *et al.*, 2020).

La pulpa amarilla de los frutos de pitahaya (*S. pruinosa*) también son una fuente de pigmentos amarillos naturales que pueden sustituir a los pigmentos sintéticos que se usan en los alimentos manufacturados. Para igualar el color amarillo de los productos comerciales, se utilizó 4.6% (p/p) de jugo o pulpa de pitahaya para complementar la preparación de gomitas de gelatina y 5% (p/v) para preparar las bebidas. Los pigmentos de las BX fueron más estables en las gomitas que en las bebidas, la retención del pigmento aumentó bajo condiciones de oscuridad y bajas temperaturas. Además, obtuvo una alta capacidad antioxidante de las BX, por lo que estos pigmentos naturales podrían ser utilizados para desarrollar productos alimenticios saludables y aumentar el valor comercial de las pitahayas (Rodríguez *et al.*, 2017).

La cáscara de frutos de pitahaya (*H. undatus*) es una fuente importante de fibra dietética y CF que poseen un alto potencial antioxidante. Debido a estas características, se obtuvo un ingrediente alimenticio en polvo que fue utilizado para la preparación de *nuggets* de pollo a concentraciones de 1.5 y 3%. La incorporación de la cáscara, en polvo, mejoró el rendimiento de cocción, la calidad nutricional, y redujo la peroxidación lipídica y la carga microbiana de los *nuggets*, sin afectar la calidad y aceptabilidad del producto. La cáscara de pitahaya proporciona beneficios para la salud de los consumidores, por lo que podría emplearse como un antioxidante natural en la industria de los alimentos cárnicos (Madane *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

Las cactáceas de los géneros *Opuntia*, *Stenocereus* y *Hylocereus* son reconocidas por su uso tradicional en la alimentación y medicina de las regiones áridas y semiáridas del país. Las partes comestibles (cladodios, frutos y flores) de estos géneros se caracterizan por su contenido nutricional, principalmente como fuente de fibra (dietética y cruda), proteína, carbohidratos y minerales (Ca y K). El consumo principal de estas

cactáceas sigue siendo en fresco, dado que la disponibilidad de los frutos como tunas, pitahayas y pitahayas es estacional y regionalmente localizada. Asimismo, la pulpa y, en algunos casos, los subproductos (cáscara y semillas) contienen una amplia gama de compuestos bioactivos, entre los que sobresalen las betaxantinas, betacianinas y CF, que los convierten en materiales promisorios para la obtención de nuevos productos con valor agregado y que podrían ser utilizados en las industrias alimenticia, cosmética y farmacéutica. Además, la pulpa, semillas, jugo y cáscara han demostrado tener efecto antioxidante, antiinflamatorio, hipolipidémico y antiobesogénico, acorde con la demanda creciente de utilizar ingredientes y productos naturales que promueven la salud. En este sentido, tanto cladodios como frutos y subproductos tienen un alto potencial para emplearse como ingredientes funcionales por su contenido de fibra, azúcares y compuestos nutraceuticos, además de que son una fuente de colorantes naturales que pueden ser utilizados como aditivos o suplementos alimenticios.

REFERENCIAS

- AL-MEKHLAFI, N. A., Ahmed M., Ismail N. H., Abas, F., Dymerski, T., Lubinska-Szczygeł, M., Vearasilp, S., y Gorinstein, S. (2021). "Metabolomic and antioxidant properties of different varieties and origins of dragon fruit", *Microchemical Journal*, 160, 105687.
- AMAYA CRUZ, D. M., Pérez-Ramírez, I. F. Delgado-García, J., Mondragón-Jacobo, C., Dector-Espinoza, A., y Reynoso-Camacho, R. (2019). "An integral profile of bioactive compounds and functional properties of prickly pear (*Opuntia ficus indica* L.) peel with different tonalities", *Food Chemistry*, 278, 568-78.
- AMMAR, I., Ben Salem, M., Harrabi, B., Mzid, M., Bardaa, S., Sahnoun, Z., Attia, H., y Ennouri, M. (2018). "Anti-Inflammatory activity and phenolic composition of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) flowers", *Industrial Crops and Products*, 112, 313-319.
- APARICIO FERNÁNDEZ, X., Loza-Cornejo, S., Torres-Bernal, M. G., Velázquez-Placencia, N. J., y Arreola-Nava, H. J. (2017). "Características fisicoquímicas de frutos de variedades silvestres de *Opuntia*

- de dos regiones semiáridas de Jalisco, México”, *Polibotánica*, 43, 219-244.
- ARGUETA, V. (ed.) (1994). *Atlas of the traditional Mexican medicinal plants*. México: Instituto Nacional Indigenista.
- ARIAS RICO, J., Cruz-Cansino, N. S., Cámara-Hurtado, M., López-Froilán, R., Pérez-Rodríguez, M. L., Sánchez-Mata M. C., Jaramillo-Morales, O. A., Barrera-Gálvez, R., y Ramírez-Moreno, E. (2020). “Study of xoconostle (*Opuntia* spp.) powder as source of dietary fiber and antioxidants”, *Foods*, 9, 403.
- ARUWA, C. E., Amoo, S. O., y Kudanga, T. (2018). “*Opuntia* (Cactaceae) plant compounds, biological activities and prospects. A comprehensive review”, *Food Research International*, 112, 328-44.
- ASTELLO GARCÍA, M. G., Cervantes, I., Nair, V., Santos-Díaz, M. S., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., Negre-Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros-Zevallos, L., y Barba de la Rosa, A. P. (2015). “Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* scultivars with different domestication gradient”, *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 119-130.
- ATTANZIO, A., Tesoriere, L., Vasto, S., Pintaudi, A. M., Livrea, M. A., y Allegra, M. (2018). “Short-term cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill] fruit supplementation ameliorates the inflammatory profile and is associated with improved antioxidant status among healthy humans”, *Food & Nutrition Research*, 62, 1262.
- CASTRO-ENRÍQUEZ, D. D., Montaña-Leyva, B., del Toro-Sánchez, C. L., Juárez-Onofre, J. E., Carvajal-Millán, E., López-Ahumada, G. A., Barreras-Urbina, C. G., Tapia-Hernández, J. A., y Rodríguez-Félix, F. (2020). “Effect of ultrafiltration of pitahaya extract (*Stenocereus thurberi*) on its phytochemical content, antioxidant capacity, and UPLC-DAD-MS profile”, *Molecules*, 25, 1-13.
- CEJUDO BASTANTE, M. J., Hurtado, N., Muñoz-Burguillos, P., y Heredia, F. J. (2019). “*Stenocereus griseus* (haw) pitahaya as source of natural colourant: technological stability of colour and individual betalains”, *International Journal of Food Science & Technology*, 54(11), 3024-3031.
- CERVANTES ARISTA, C., Román-Guerrero, A., Oidor-Chan, V. H., Díaz de León-Sánchez, F., Álvarez-Ramírez, E. L., Pelayo-Zaldívar, C.,

- Sierra-Palacios, E. C., y Mendoza-Espinoza, J. A. (2020). “Chemical characterization, antioxidant capacity, and anti-hyperglycemic effect of *Stenocereus stellatus* fruits from the arid Mixteca Baja region of Mexico”, *Food Chemistry*, 328, 1-10.
- CHUCK HERNÁNDEZ, C., Parra-Saldívar, R., y Sandate-Flores, L. (2016). “Pitahaya (*Stenocereus* spp.)”, en B. Caballero, P. M. Finglas y F. Toldrá (eds.), *Encyclopedia of Food and Health*. Elsevier, PA: Academic Press, 385-391.
- DELGODA, R., y Murray, J. E. (2017). “Evolutionary perspectives on the role of plant secondary metabolites”, en S. Badal y R. Delgoda (eds.), *Pharmacognosy fundamentals, applications and strategies*. Boston: Academic Press, 93-100.
- DÍAZ DE LEÓN SÁNCHEZ, F., Hernández, P. D., Rodríguez Verástegui, L. L., Oidor-Chang, V. H., Cervantes-Arista, C., Aarland, R. C., Sierra-Palacios, E., y Mendoza-Espinoza, J. A. (2020). “Chemical composition of juice and antihyperglycemic studies in seed of the prehispanic fruit tunillo (*Stenocereus stellatus*) collected in Oaxaca, México”, *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 19(3), 580-584.
- DU TOIT, A., De Wit, M., y Hugo, A. (2018). “Cultivar and harvest month influence the nutrient content of *Opuntia scactus* pear cladode mucilage extracts”, *Molecules*, 23, 916.
- EKA, Y., Hendarto, H., y Widjiati. (2017). “Effect of *Hylocereus polyrhizus* rind extract toward interleukin-1 β , vascular endothelial growth factor expression, endometriosis implant area”, *International Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 9(8), 617-621.
- FERNÁNDEZ LÓPEZ, J. A., Roca, M. J., Angosto, J. M., y Obón, J. M. (2018). “Betaxanthin-rich extract from cactus pear fruits as yellow”, *Plant Foods for Human Nutrition*, 73, 146-153.
- FERRERES, F., Grossob, C., Gil-Izquierdo, A., Valentão, P., Mota A.T., y Andrade, P. B. (2017). “Optimization of the recovery of high-value compounds from pitahaya fruit by-products using microwave-assisted extraction”, *Food Chemistry*, 230, 463-474.
- FIDRIANNY, I., Ilham, N., y Hartati, R. (2017). “Antioxidant profile and phytochemical content of different parts of super red dragon fruit (*Hylocereus costaricensis*) collected from West Java-Indonesia”,

Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research, 10(12), 290-294.

- GARCIA-AMEZQUITA, L. E., Tejeda-Ortigoza, V., Heredia-Olea, E., Serna-Saldívar, S. O., y Welti-Chanez, J. (2018). "Differences in the dietary fiber content of fruits and their by-products quantified by conventional and integrated AOAC official methodologies", *Journal of Food Composition and Analysis*, 67, 77-85.
- GARCÍA-CRUZ, L., Dueñas, M., Santos-Buelgas, C., Valle-Guadarrama, S., y Salinas-Moreno, Y. (2017). "Betalains and phenolic compounds profiling and antioxidant capacity of pitahaya (*Stenocereus* spp.) fruit from two species (*S. pruinosus* and *S. stellatus*)", *Food Chemistry*, 234, 111-118.
- GARCÍA-CRUZ, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., y Joaquín-Cruz, E. (2013). "Physical, chemical, and antioxidant activity characterization of pitahaya (*Stenocereus pruinosus*) fruits", *Plant Foods for Human Nutrition*, 68, 403-410.
- GIGLIO, R. V, Carruba, G., Cicero, A., Banach, M., Patti, A. M., Nikolic, D., y Cocciadiferro, L. (2020). "Pasta supplemented with *Opuntia ficus-indica* extract improves metabolic parameters and reduces atherogenic small dense low-density lipoproteins in patients with risk factors for the metabolic syndrome: a four-week intervention study", *Metabolites*, 10(11), 428.
- HERNÁNDEZ-BECERRA, E., Gutiérrez-Cortez, E., del Real, A., Rojas-Molina, A., Rodríguez-García, M., Rubio, E., Quintero-García, M., y Rojas-Molina, I. (2017). "Bone mineral density, mechanical, microstructural properties and mineral content of the femur in growing rats fed with cactus *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. (cactaceae) cladodes as calcium source in diet", *Nutrients*, 9, 108.
- HERNÁNDEZ-RAMOS, L., García-Mateos, M. R., Castillo-González, A. M., Ybarra-Moncada, C., y Nieto-Ángel, R. (2020). "Fruits of the pitahaya *Hylocereus undatus* and *H. ocamponis*: nutritional components and antioxidants", *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 93, 197-203.
- HERNÁNDEZ-VIDAL, E., Blanco-Macías, F., González-Torres, A., Véliz-Deras, F. G., Gaytán-Alemán, L., y Valdez-Cepeda, R. D. (2021). "Boundary-line approach macro-nutrient standards for *Opuntia*

- ficus-indica* (L.) Miller variety ‘Rojo Pelón’ fruiting”, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 467-475.
- HERNAWATI, N. A., Shintawati, R, y Priyandoko, D. (2018). “The role of red dragon fruit peel (*Hylocereus polyrhizus*) to improvement blood lipid levels of hyperlipidaemia male mice”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1013,12167.
- IBRAHIM, S. R. M., Gamal A. M., Amgad I. M. K., Mohamed F. Z., Iy Amal A. S E. (2018). “Genus *Hylocereus*: beneficial phytochemicals, nutritional importance, and biological relevance. A review”, *Journal of Food Biochemistry*, 42 (2), e12491.
- ISMAIL, O., Mohamed S. A., Mosad, A. G., y Hassan, R. (2017). “Exploring the biological activities of the *Hylocereus polyrhizus* extract”, *Journal of Innovations in Pharmaceutical and Biological Sciences*, 4, 1-6.
- JALGAONKAR, K., Mahawar, M. K., Bibwe, B., y Kannaujia, P. (2020). “Postharvest profile, processing and waste utilization of dragon fruit (*Hylocereus* spp.): a review”, *Food Reviews International*, doi: 10.1080/87559129.2020.1742152.
- JIMÉNEZ-AGUILAR, D. M., López-Martínez, J. M., Hernández-Brenes, C. Gutiérrez-Urbe, J. A., y Welti-Chanes, J. (2015). “Dietary fiber, phytochemical composition and antioxidant activity of Mexican commercial varieties of cactus pear”, *Journal of Food Composition and Analysis*, 41, 66-73.
- KARUNANITHI, A., y Venkatachalam, S. (2019). “Ultrasonic-assisted solvent extraction of phenolic compounds from *Opuntia ficus-indica* peel: phytochemical identification and comparison with soxhlet extraction”, *Journal of Food Process Engineering*, 42(5), 1-10.
- KHATABI, O., Hanine, H., Elothmani, D., y Hasib, A. (2016). “Extraction and determination of polyphenols and betalain pigments in the Moroccan Prickly pear fruits (*Opuntia ficus indica*)”, *Arabian Journal of Chemistry*, 9, 278-281.
- KIVRAK, Ş., Kivrak, İ., y Karababa, E. (2018). “Analytical evaluation of phenolic compounds and minerals of *Opuntia robusta* J.C. Wendl. and *Opuntia ficus-barbarica* A. Berger”, *International Journal of Food Properties*, 21(1), 229-241.

- KOUBAA, M., Mhemdi, H., Barba, F. J., Angelotti, A., Bouaziz, F., Chaabounic, S. E., y Vorobiev, E. (2016). "Seed oil extraction from red prickly pear using hexane and supercritical CO₂: assessment of phenolic compound composition, antioxidant and antibacterial activities", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(2), 613-620.
- LE, F., y Vaillant, F. (2011). "Pitahaya (pitahaya) (*Hylocereus* spp.)", en E.M. Yahia (ed.), *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits*. Oxford, Reino Unido: Woodhead Publishing, 247-273e.
- LIRA, S. M., Dionísio, A. P., Holanda, M. O., Gomes, C., da Silva, S., Correa, L. C., y Moreira, G. B. (2020). "Metabolic profile of pitahaya (*Hylocereus polyrhizus* (F.A.C. Weber) Britton & Rose) by UPLC-QTOF-MSE and assessment of its toxicity and anxiolytic-like effect in adult zebrafish", *Food Research International*, 127, 108701.
- MADANE, P., Das, A. K., Nanda, P. K., Bandyopadhyay, S., Jagtap, P., Shewalkar, A., Y Maity, B. (2020). "Dragon fruit (*Hylocereus undatus*) peel as antioxidant dietary fibre on quality and lipid oxidation of chicken nuggets", *Journal of Food Science and Technology*, 57(4), 1449-1461.
- MANIHURUK, F. M., Suryati, T., y Arief, I. I. (2017). "Effectiveness of the red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peel extract as the colorant, antioxidant, and antimicrobial on beef sausage", *Media Peternakan*, 40(1), 47-54.
- MELGAR, B., Diasa, M. I., Ciric, A., Sokovic, M., García-Castello, E. M., Rodríguez-López, A. D., Barrosa, L., y Ferreira, I. (2017). "By-product recovery of *Opuntia* speels: betalainic and phenolic profiles and bioactive properties", *Industrial Crops & Products*, 107, 353-359.
- MISSAOUI, M., D'Antuonu, I., D'Imperio, M., Linsalata, V., Boukhchina, S., Logrieco, A.F., y Cardinali, A. (2020). "Characterization of micronutrients, bioaccessibility and antioxidant activity of prickly pear cladodes as functional ingredient", *Molecules*, 25, 2176.
- MONTADHER, M. A., Mohammed, M., Jassim, A. M. N., y Mohammed, A. I. (2018). "Phytochemical content and anti-oxidant activity of

- Hylocereus undatus* and study of toxicity and the ability of wound treatment”, *Plant Archives*, 18, 2672-2680.
- NAZERI, M. A., y Zain, N. M. (2018). “Effect of different operating parameters on extraction of active compounds from pitahaya peel by microwave assisted extraction (MAE)”, *Journal Teknologi*, 80(2), 51-58.
- ONISZCZUK, A., Wójtowicz, A., Oniszczuk, T., Matwijczuk, A., Dib, A., y Markut-Miotła, E. (2020). “Opuntia fruits as food enriching ingredient, the first step towards new functional food products”, *Molecules*, 25, 916.
- PARAFATI, L., Restuccia, C., Palmeri, R., Fallico, B., y Arena, E. (2020). “Characterization of prickly pear peel flour as a bioactive and functional ingredient in bread preparation”, *Foods*, 9, 1189.
- PÉREZ LOREDO, M.G., Hernández-de Jesús, L., y Barragán-Huerta, B. E. (2017). “Extracción de compuestos bioactivos de pitahaya roja (*Stenocereus stellatus*) aplicando pretratamientos con microondas, ultrasonido y enzimáticos”, *Agrociencia*, 51, 135-151.
- RAMÍREZ RODRÍGUEZ, Y., Martínez-Huélamo, M., Pedraza-Chaverri, J., Ramírez, V., Martínez-Tagüeña, N., y Trujillo, J. (2020). “Ethnobotanical, nutritional and medicinal properties of Mexican drylands cactaceae fruits: recent findings and research opportunities”, *Food Chemistry*, 312, 126073.
- ROCCHETTI, G., Pellizzoni M., Montesano D., y Lucini L. (2018). “Italian *Opuntia ficus-indica* cladodes as rich source of bioactive compounds with health-promoting properties”, *Foods*, 7, 1-12.
- 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.
- SÁNCHEZ TAPIA, M., Aguilar-López, M., Pérez-Cruz, C., Pichardo-Ontiveros, E., Wang, M., Donovan, S., Tovar, A., y Torres, N. (2017). “Nopal (*Opuntia ficus indica*) protects from metabolic endotoxemia by modifying gut microbiota in obese rats fed high fat/sucrose diet”, *Scientific Reports*, 7(1), 4716.
- SANTOS, G. B. M., Dionísio, A. P., Rodrigues, H. C, Pinto, F. A., Machado, S., Viana de Lima, A. C., y Silvestre, G. (2020). “Effects

- of processing on the chemical, physicochemical, enzymatic, and volatile metabolic composition of pitahaya (*Hylocereus polyrhizus* (F.A.C. Weber) Britton & Rose)", *Food Research International*, 127, 108710.
- SOM, A. M., Ahmat, N., Abdul Hamid, H. A., y Azizuddin, N. (2019). "A comparative study on foliage and peels of *Hylocereus undatus* (white dragon fruit) regarding their antioxidant activity and phenolic content", *Helijon*, 5, 1-13.
- SONG, H., Chu, Q., Xu, D., Xu, Y., y Zheng, X. (2016). "Purified betacyanins from *Hylocereus undatus* peel ameliorate obesity and insulin resistance in high-fat-diet-fed mice", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(1), 236-244.
- SONG, H., Zheng, Z., Wu, J., Lai, J., Chu, Q., y Zheng, X. (2016). "White pitahaya (*Hylocereus undatus*) juice attenuates insulin resistance and hepatic steatosis in diet-induced obese mice", *PloS One*, 11(2), e0149670-e0149670.
- TEL, Z. N., Abbo, S., Bar, Z. D., y Mizrahi, Y. (2004). "Clone identification and genetic relationship among vine cacti from the genera *Hylocereus* and *Selenicereus* based on RAPD analysis", *Scientia Horticulturae*, 100(1-4), 279-289.
- VERONA-RUIZ, A., Urcia-Cerna, J., y Paucar-Menacho L. M. (2020). "Pitahaya (*Hylocereus* spp.): Cultivo, características físicoquímicas, composición nutricional y compuestos bioactivos", *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 439-453.
- VIJAYAKUMAR, R., Abd Gani, S. S., Hasanah Zaidan, U., Effendi Halmi, M. I., Karunakaran, T., y Razak Hamdan, M. (2020). "Exploring the potential use of *Hylocereus polyrhizus* peels as a source of cosmeceutical sunscreen agent for its antioxidant and photoprotective properties", *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 117, 1-12.
- WIDYANINGSIH, A., Setiyani, O., Umaroh, M., Achsan, U., y Amri, F. (2017). "Effect of consuming red dragon fruit (*Hylocereus costaricensis*) juice on the levels of hemoglobin and erythrocyte among pregnant women", *Belitung Nursing Journal*, 3(3), 255-264.
- WIT, M. de, Du Toit, A., Osthoff, G., y Hugo, A. (2020). "Antioxidant content, capacity and retention in fresh and processed cactus pear

(*Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*) fruit peels from different fruit-colored cultivars”, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 1-14.

Wu, Y., Xu, J., He, Y., Shi, M., Han, X., Li, W., Zhang, X., y Wen, X. (2019). “Metabolic profiling of pitahaya (*Hylocereus polyrhizus*) during fruit development and maturation”, *Molecules*, 24(6), 1114.

CAPÍTULO 21
PANORAMA EPIDEMIOLÓGICO DE
LAS ENFERMEDADES CRÓNICO-
DEGENERATIVAS E IMPORTANCIA DEL
CONOCIMIENTO LOCAL Y TRADICIONAL
DE LAS COMUNIDADES DE ZONAS ÁRIDAS

ANTONIO RICO¹
YADIRA RAMÍREZ²
NATALIA MARTÍNEZ-TAGÜEÑA³
OMAR CASANOVA⁴
JOYCE TRUJILLO⁵

RESUMEN

Las enfermedades crónico-degenerativas no transmisibles (ECDNT) son un conjunto de enfermedades con efectos a largo plazo no transmisibles, ni infecciosos. Algunas de estas enfermedades son la presión arterial elevada, obesidad, hiperlipidemias, diabetes mellitus y síndrome metabólico, las cuales son responsables del 71% de las muertes alrededor del mundo. En México, factores como cambios en los patrones de alimentación, sedentarismo, consumo de alimentos procesados, entre otros, han propiciado el aumento de las ECDNT. Entre las regiones con mayor prevalencia de ECDNT, está la norte, en la cual habitan distintos grupos originarios como *o'odham*, *pa ipai*, seris, rarámuris, etc.; comunidades

¹ División de Materiales Avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipcyt), San Luis Potosí, S.L.P., CP 78216. / Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P., CP 78210.

² División de Materiales Avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipcyt). / División de Biología Molecular, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipcyt).

³ División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipcyt).

⁴ Comité de Salud Comcaac (Haxöl Iihom y Socaaix). Desemboque, Punta Chueca, Sonora, CP 83717.

⁵ División de Materiales Avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipcyt). Autora de correspondencia: daniela.trujillo@ipicyt.edu.mx

que han experimentado un aumento significativo de estas enfermedades en los últimos años, lo cual se relaciona con factores como migración, industrialización y carencia de servicios médicos en sus comunidades. Estos pueblos originarios, a lo largo de los años, le han hecho frente a las ECDNT mediante la medicina tradicional a base de plantas medicinales. Sin embargo, la presión que la globalización ha ejercido en el mundo ha impactado en los usos y costumbres de estos pueblos originarios, y han modificado su dieta (transición alimentaria) y, por tanto, su salud. El objetivo de este capítulo es informar sobre la situación actual de las ECDNT en las zonas áridas y sémiáridas del norte de México, para formular estrategias que promuevan un estilo de vida saludable a través de la protección de los recursos naturales y del fomento del conocimiento local y tradicional.

PALABRAS CLAVE: enfermedades crónico-degenerativas, medicina tradicional, pueblos originarios, zonas áridas.

SITUACIÓN ACTUAL DE LAS ECDNT EN LAS ZONAS ÁRIDAS DEL NORTE DE MÉXICO

Las enfermedades crónico-degenerativas no transmisibles (ECDNT) se definen como cualquier afección de salud de larga duración o que tiene efectos a largo plazo y no es transmisible ni infecciosa en su etiología (OMS, 2018). La Organización Mundial de la Salud (OMS) incluye a las cardiopatías, los accidentes cerebrovasculares, el cáncer, la diabetes y las enfermedades pulmonares crónicas (enfermedad pulmonar obstructiva crónica y asma); además, reportó que estas patologías son responsables de casi el 71% de las muertes en todo el mundo, mientras México reportaba un 81% para el mismo año. Este tipo de enfermedades afectan de manera desproporcionada a las personas pertenecientes a países de ingresos bajos y medianos, donde se producen 32 millones de muertes por ECDNT en el mundo (OMS, 2018), por lo que se les considera una pandemia.

En México, desde 1950 a la fecha, se ha experimentado una reducción en la tasa de mortalidad en general, derivado de la reducción en la tasa de mortalidad infantil. No obstante, las reducciones en la mortalidad de adultos son relativamente pequeñas y contribuyen en menor medida en esta reducción de las tasas de mortalidad en general, como sucede en la mayoría de los países latinoamericanos (Calazans y Queiroz, 2020).

Por otro lado, la “teoría de cronicidad” plantea que ciertos procesos políticos, económicos, tecnológicos, sociales y culturales de la globalización han generado cambios conductuales en las personas e inciden en el aumento de problemas de salud asociados a las ECDNT (Manderson, 2010; Wiedman, 2012; Wiedman, 2010). Por consiguiente, las ECDNT se han vuelto más prominentes en México y en el mundo (Calazans y Queiroz, 2020; Marinho *et al.*, 2013), debido a comportamientos nocivos para la salud, como cambios en los patrones de alimentación, aumento en el consumo de comida ultraprocesada, sedentarismo, consumo elevado de bebidas alcohólicas y tabaquismo (Barba, 2018; Calazans y Queiroz, 2020; OMS, 2018). Adicionalmente, se debe tomar en cuenta que el sistema nacional de salud mexicano se encuentra fraccionado en varios subsistemas con deficiencias y múltiples problemas de resolución sobre la equidad en el acceso y la calidad de los servicios (Meaney *et al.*, 2019; OPS, 2018).

El conjunto de todos estos factores han llevado a cambios en el estilo de vida e influido en el comportamiento epidemiológico de las ECDNT, con mayores condiciones de riesgo para la población en general, que finalmente representan un gran reto para cualquier sistema de salud, y causan incapacidad prematura, así como un alto costo y un complejo manejo terapéutico (Calazans y Queiroz, 2020). Por ejemplo, se ha descrito que la obesidad alcanzará gastos hospitalarios por 1 200 millones de dólares para 2030 y 1 700 millones para 2050 en México (Aceves *et al.*, 2021); los altos costos se derivan del incremento en la demanda de servicios de atención en el corto, mediano y largo plazo, así como de costos para su atención, principalmente generados por las complicaciones desarrolladas (Barba, 2018). Asimismo, dichas patologías incrementan las complicaciones y la mortalidad de otras enfermedades, como el actual síndrome respiratorio agudo severo coronavirus 2 (SARS-CoV-2), por lo que las pandemias globales demuestran que están interconectadas y sus efectos se acentúan en poblaciones con elevada tasas de ECDNT (Chang *et al.*, 2020; Stefan *et al.*, 2021).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), la región norte de México, la cual representa gran parte del desierto mexicano (Baja California, Sonora; Durango, Chihuahua, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila), reporta cifras elevadas de ECDNT, que afectan en mayor medida a la población residente de zonas urbanas; todo ello, asociado a la transición alimentaria y a la poca accesibilidad a la alimentación saludable (Inegi, 2020). En las zonas rurales y en comunidades indígenas, los estudios son escasos, pero también se presentan cifras elevadas de estas enfermedades, como se describe en el presente capítulo.

Con todo lo anterior, el objetivo de este capítulo es informar la situación actual de las ECDNT en las zonas áridas y semiáridas del norte de México, para formular estrategias que promuevan un estilo de vida saludable mediante la protección de los recursos naturales y del fomento del conocimiento local y tradicional; y para ello, es necesario replantear y reformar las estrategias locales y nacionales de salud, en donde miembros de comunidades locales y miembros del sector civil y académico participen directamente en el desarrollo de estrategias de manera multisectorial. Así, se deben promover e incentivar la prevención y el tratamiento, más allá de los fármacos, con programas participativos e

intersectoriales que fomenten estilos de vida saludables y la promoción explícita de las prácticas de la cocina y el uso de alimentos tradicionales. En particular en las zonas áridas del norte del país, es imprescindible incentivar la revaloración de prácticas y dietas locales y tradicionales que conllevan alimentos más sanos de acceso estacional, junto con los sistemas agroalimentarios locales, con el objetivo de reducir las cifras y las complicaciones de las ECDNT.

PREVALENCIA DE LAS ECDNT EN EL DESIERTO MEXICANO

Diabetes mellitus

La diabetes mellitus (DM) es una enfermedad crónico degenerativa que se caracteriza por un deterioro en la capacidad para metabolizar carbohidratos debido a la secreción inadecuada o a la ineficacia de la insulina disponible, lo que origina un aumento en la concentración de glucosa en sangre (hiperglucemia) (Saucedo *et al.*, 2006). A partir del siglo XX, la DM ha aumentado de manera exponencial y se ha vuelto un problema de salud en México y el mundo (Alvarado-Osuna *et al.*, 2001; CIAD, 2020; Yáñez, 2013). La Federación Internacional de Diabetes estimó en 2019 una prevalencia mundial de 9.3%, es decir, 463 millones de adultos con DM, y se calcula que aumente a 700 millones para 2045, con una prevalencia de 10.9% (11.1% en hombres y 10.8% en mujeres). Se sabe que la prevalencia es mayor en la población urbana (10.9%) que en la rural (7.2%), y que, en el mundo, una de cada dos personas con diabetes no sabe que tiene la enfermedad (CIAD, 2020). En México, la información publicada por la Encuesta Nacional de Enfermedades Crónico-Degenerativas, así como por la Organización Panamericana de la Salud, indica que tanto las ECDNT como la DM ocupan las primeras causas de morbimortalidad en el norte del país (Saucedo *et al.*, 2006). En las subsecuentes ediciones de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición, 2012 y 2018, se reportó que la prevalencia de DM en los estados del norte de México es del 10.7%, donde Coahuila, Tamaulipas y Nuevo León son las entidades con mayor prevalencia (Inegi, 2020). Esta vigilancia epidemiológica nos muestra la situación actual de las zonas urbanizadas.

Sin embargo, la DM es frecuente tanto en zonas rurales como en zonas urbanas de los pueblos originarios del norte del país (Yáñez, 2013).

A este respecto, Von Glascoe *et al.* (2009) refieren que la DM es una amenaza para la sobrevivencia de los pueblos originarios en el ámbito mundial, ya que ha reemplazado a las enfermedades infecciosas. Es importante señalar que no hay cifras precisas disponibles sobre la prevalencia de DM en las comunidades indígenas del norte de México; los gobiernos raramente poseen estadísticas sanitarias sobre estas comunidades o no las proporcionan. Sin embargo, los datos disponibles indican que, en la mayoría de las zonas, las cifras son alarmantes y que, aunque por lo general no está diagnosticada, la DM es una de las principales causas de muerte entre las comunidades de los pueblos originarios (Yáñez, 2013).

Múltiples investigaciones en México han tratado estos problemas y la manera en que las ECDNT se han desarrollado entre los pueblos originarios. Bennett *et al.* (1971) realizaron estudios sobre la prevalencia de DM tipo 2 en pueblos *o'odham* (exónimo: pimas y pápagos), que sirvieron para estandarizar la metodología en el estudio de diabetes en el mundo y, sobre todo, para definir el punto de corte entre normal y anormal (Bennett *et al.*, 1971; Moreno, 2001). Alvarado *et al.* (2001) señalan que la DM se presentó de manera alarmante desde 1970, y que aun cuando hay pocos estudios sobre la prevalencia de trastornos metabólicos en pueblos originarios, se reportó 6.3% y 10.5% en hombres y mujeres respectivamente, de pueblos *o'odham* de Sonora. En el caso de los *xawill kwñchawaay* (exónimo: cucapá, quienes viven en el valle de Mexicali y Baja California), la DM los ha impactado notoriamente en edades tempranas, lo cual puede atribuirse a su estrategia de vida, en donde ellos salen de sus comunidades a buscar trabajo a la ciudad y modifican sus hábitos alimentarios (Yáñez, 2013). Además, Yáñez (2013) realizó una investigación sobre la susceptibilidad genética entre las comunidades de Haxöl Iihom (El Desemboque) y Socaaix (Punta Chueca) del desierto de Sonora, *comcaac* (exónimo: seris), para conocer la incidencia de DM entre ellas, y observó que existe una diferencia significativa de 20 y 40%, consecutivamente, de tolerancia a la glucosa y el incremento de DM, debido, entre otras cosas, a la alimentación aculturada, que es más notoria en la comunidad Socaaix. Sobre estos datos reportados por Yáñez (2013), integrantes *comcaac* mencionan que estas tendencias no se

relacionan con migración sino con una transición notoria y significativa en sus modos de vida, con el incremento en el sedentarismo y cambios en los hábitos alimentarios. También se relaciona con la falta de apego a un control médico y nutricional, derivado de que el personal de salud que asistía a las comunidades regularmente empleaba terminología que dificulta la interacción con los integrantes de la comunidad, lo que desencadenaba un desinterés en los tratamientos de estas patologías.

Desde hace cuarenta años existen integrantes *comcaac* que estudian y practican enfermería. No obstante, existe entre su población ECDNT, que además forman parte del personal de salud, que están enfocados en aplicar programas de prevención y manejo de estas patologías de manera integral (comentarios personales de Omar Casanova). Así, han desarrollado un comité de salud basado en el conocimiento tradicional y científico, el cual está integrado por personal de salud *comcaac*, programas de huertos orgánicos de traspatio y promoción de actividad física asociada a su trabajo, una alimentación saludable y uso de medicina tradicional, lo que ha derivado en la instalación de una farmacia tradicional. Todas estas actividades están coordinadas por el mismo comité de salud *comcaac* y en colaboración con organizaciones nacionales y extranjeras. Omar Casanova, miembro del comité, menciona que están comenzando a ver excelentes resultados, relacionados con el apego a los tratamientos, y refiere que han llevado a cabo un adecuado manejo de infecciones por SARS-CoV-2.

Por último, en el norte de México, se destaca el pueblo de los *rarámuri* (exónimo: tarahumaras), que habitan en la Sierra Madre Occidental. La Comisión Estatal para los Pueblos Indígenas, en Chihuahua, nos dice que actualmente existen ocho asentamientos rarámuris registrados, de los cuales El Oasis es el más antiguo y grande (Alvarado *et al.*, 2001). Por tanto, en este asentamiento, Manzanero-Rodríguez *et al.* (2018) estudiaron un total de setenta personas, donde se observó una prevalencia de DM tipo 2 de 17.1%, que es mayor en hombres (37.1%) que en mujeres (25.7%). En los resultados obtenidos por edades, los autores observaron una mayor prevalencia de DM tipo 2 en mayores de sesenta años (40%); pero a edades más tempranas (18-39 años), la prevalencia fue alta (30.6%). Se atribuye este resultado a la migración rarámuri a la ciudad de Chihuahua, debido a diversos aspectos socioeconómicos,

falta de acceso a la educación y sistemas de salud, o conflictos personales (Manzanero-Rodríguez *et al.*, 2018).

Tratamiento

En el control médico de la DM, el tratamiento farmacológico se ha ampliado y diversificado de manera importante en los últimos años, de tal forma que en la actualidad se cuenta con una gran variedad de medicamentos (la mayoría hipoglucemiantes) útiles en el control de esta enfermedad. Sin embargo, aun así no son el 100% efectivos, y no se ha podido alcanzar el control de los niveles de glucosa recomendados a escala internacional, aunado a la disponibilidad geográfica y económica del tratamiento. Por ello, junto al tratamiento farmacológico, la mayoría de los pacientes modifican sus estilos de vida (control dietario, limitación del tabaquismo y el consumo de alcohol), realizan actividad física y cada vez, en mayor frecuencia, hacen uso de la medicina alternativa (Ayala *et al.*, 2002; Saucedo *et al.*, 2006, Roldán *et al.*, 2011).

En México, la mayor parte del conocimiento tradicional que se tiene acerca de las plantas medicinales proviene de la época prehispánica, y actualmente diversos grupos originarios lo conservan. Hasta la fecha, se tienen registradas más de trescientas especies vegetales de unas setenta familias diferentes, que, según información etnobotánica registrada en el Herbario Medicinal del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), son usadas de manera tradicional para el tratamiento de la DM (Esquivel *et al.*, 2012).

Entre las plantas más utilizadas para el tratamiento tradicional de DM, así como sus compuestos bioactivos hipoglucemiantes, destacan el nopal (*Opuntia ficus-indica*), por su contenido de fibra soluble (Saucedo *et al.*, 2006); el guarumbo o chancarro (*Cecropia obtusifolia*), por su contenido de ácido clorogénico; la isoorientina (Cadena-Zamudio *et al.*, 2018); la guácima, guácimo o cualote (*Guazuma ulmifolia*) y la tronadora (*Tecoma stans*), por sus efectos hipoglucemiantes asociados al contenido de alcaloides –tecomina, tecostanina y trigonina– (Alonso-Castro y Salazar-Olivo, 2008; Torres-Xocua, 2019), y el cuajilote (*Parmentiera aculeata*), por su contenido de polifenoles (Santiago *et al.*, 2021). En una

investigación llevada a cabo en el pueblo originario sonoreño *yoreme* (exónimo: mayos), se detectó la utilización de plantas como coadyuvantes en el tratamiento de la DM, en las que sobresale la chaya (*Cnidoscolus chayamansa*), en la cual las hojas se consumen en forma de té, y sus propiedades antidiabéticas se le atribuyen a su contenido de flavonoides, en especial catequina y rutina (Valenzuela *et al.*, 2015). Otra de las plantas consumidas por el pueblo *yoreme* es el *warequi* (*Ibervillea sonora*), una planta rastrera o trepadora de raíz abultada con aspecto de jícama, nativa del desierto de Sonora, de la cual su raíz es consumida en forma de cápsulas y cuyas propiedades antidiabéticas se le atribuyen a su contenido de alcaloides, cumarinas, flavonoides, quinonas y saponinas (Alarcón-Aguilar *et al.*, 2002). Otras especies frecuentemente utilizadas de manera tradicional en el desierto de Sonora son el cactus estrella (*Lophocereus schottii*), del cual se usa el tallo para curar heridas, llagas, DM, úlceras y cánceres estomacales, propiedades asociadas a su contenido de alcaloides de isoquinolina, lofocerina y pilocereina (Paniagua-Domínguez *et al.*, 2008) y la choya (*Opuntia fulgida*), por su alto contenido de fibra soluble (Saucedo *et al.*, 2006).

Sin embargo, cabe resaltar que el uso del conocimiento asociado a la medicina tradicional únicamente se debe emplear con el consentimiento previo e informado de las personas o comunidades permitentes (tanto los dueños del terreno en donde el recurso se encuentra como las personas que cuentan con el conocimiento asociado) (Trujillo *et al.*, 2018). Existen diversos marcos legales y éticos, como es el caso del Protocolo de Nagoya, en donde se describen lineamientos que se han de seguir para solicitar permisos de uso y, si fuera el caso, para la redistribución de recursos obtenidos por su comercio.

No obstante, se debe puntualizar que es de suma importancia que, derivado de las tendencias de la transición notoria en los modos de vida, hay falta de apego a un control médico y nutricional, y acceso limitado a los servicios de salud, por lo que es importante aplicar estrategias que permitan valorar el uso del conocimiento de la medicina tradicional (farmacia tradicional *comcaac*), empleada desde épocas prehispánicas en los pueblos originarios, donde destaca que este conocimiento se ha reflejado en estudios de ciencia básica y estudios clínicos en el control y tratamiento de DM.

Hipertensión arterial

La hipertensión arterial (HTA) o presión alta es una patología crónica no transmisible, en la que los vasos sanguíneos tienen una tensión persistentemente alta, lo cual es un factor de riesgo para desarrollar enfermedades cardiovasculares, como infarto agudo al miocardio, enfermedad vascular periférica, accidente cerebrovascular e insuficiencia renal (Castro-Juárez *et al.*, 2018). La HTA está distribuida en todas las regiones del mundo, atendiendo múltiples factores de índole económico, social, cultural y ambiental. La prevalencia ha ido en aumento, asociada a patrones alimentarios inadecuados, disminución de la actividad física y otros factores metabólicos, como obesidad, DM y dislipidemias, lo que representa un problema sanitario de gran magnitud en México y el mundo (Brito-Zurita *et al.*, 2012; Campos-Nonato *et al.*, 2019), y es una de las principales causas de muerte en el mundo. Se estima que en el mundo hay 1 130 millones de personas con HTA, y la mayoría de ellas (cerca de dos tercios) vive en países de ingresos bajos y medianos; por ello, la prevalencia mundial de la HTA es aproximadamente del 30%, y causa cada año 9.4 millones de fallecimientos (Campos-Nonato *et al.*, 2019; OMS, 2019).

En México, el último informe de la Ensaut (Secretaría de Salud *et al.*, 2018) informó que la prevalencia de HTA fue de 18.4% (uno de cada cuatro adultos), siendo Campeche, Sonora, Veracruz, Chihuahua y Coahuila las entidades con mayor prevalencia (Castro-Juárez *et al.*, 2018), en particular, en los estados del norte se alcanzan cifras de prevalencia del 20.4%, porcentaje relacionado con una alimentación alta en grasas, baja en fibra, así como relacionado con su clima extremo y el sedentarismo. Por ejemplo, Campos-Nonato *et al.* (2019) realizaron un estudio donde observaron un aumento en la prevalencia de HTA de 49.2% (46.8% en mujeres y 52.2% en hombres) en adultos mexicanos, social y económicamente vulnerables. Por desgracia, en la mayoría de los países del mundo, los pueblos originarios tienen desventajas económicas y acceso limitado a los servicios de salud, comparados con la población general (Castro-Juárez *et al.*, 2018).

En 2018, se realizó un estudio con un total de 108 integrantes del pueblo yaqui (80 mujeres y 28 hombres), en el estado de Sonora, con una edad media de 41.5 ± 13.9 años. La prevalencia de HTA fue del 12.0%

para la población total, siendo mayor en mujeres (13.7%) que en hombres (7.1%), resultado asociado al tipo de rol que desempeñan, como artesanías y gastronomía para las mujeres, siendo actividades sedentarias, y actividades con mayor movimiento, como la pesca y la agricultura, para los hombres (Castro-Juárez *et al.*, 2018).

Por su parte, Moreno-Ulloa *et al.*, (2018) realizaron un estudio con el objetivo de comparar la prevalencia de HTA entre cien integrantes del pueblo rarámuri de las comunidades Guadalupe y Calvo, Guachochi, Urique, Uruachi, Maguarichi, Carichí y Temósachi y 104 habitantes de las zonas urbanas de la ciudad de Chihuahua: Pino Alto, Oasis y Ladrillera Norte, de ambos sexos, de 18 a 75 años, en el cual encontraron una mayor prevalencia de HTA en hombres y mujeres de la zona urbana (34.3% y 23.0%, respectivamente) en comparación de las zonas rurales (22.5% y 15.6%). Estos resultados sugieren que la migración de los rarámuris a la ciudad de Chihuahua propicia la modificación de sus hábitos de alimentación y estilos de vida, donde destaca un mayor sedentarismo e ingesta de alimentos procesados. En el caso de las comunidades *com-caac* de Punta Chueca y Desemboque, Sonora, se realizó un estudio en 2019, con 229 habitantes de ambas zonas (70 hombres y 159 mujeres), y mostró una prevalencia de HTA de 44.5%; en este caso, mayor en hombres (51.2%) que en mujeres (41.5%), asociado al consumo de alcohol y tabaco (Peñuñuri, 2015).

Tratamiento

El tratamiento farmacológico habitual en esta patología se caracteriza por el uso de diuréticos, inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina, antagonistas de calcio y antagonistas de la angiotensina II, entre otros, aunado a los cambios de hábitos, como régimen dietético, actividad física, disminución del consumo de alcohol y tabaco. Sin embargo, ante el difícil acceso y los altos costos que pueden representar estos tratamientos, una alternativa muy común para el tratamiento de HTA en los pueblos originarios es el uso de la medicina tradicional (Esquivel *et al.*, 2012; Gutiérrez, 2001). En el norte de México existen pueblos originarios que acostumbran el uso de remedios herbolarios para tratar diversos signos

y síntomas, relacionados a la HTA. Por ejemplo, los *o'odham* (exónimo: tepehuanes) de la zona norte del estado de Veracruz; el pueblo *akwa'ala* (exónimo: paipai) del norte de Baja California; los rarámuris, los *comcaac* y los *o'odham* conocen una extensa variedad de plantas (Jiménez-Corona y Mateo-Rivera, 2019; Manzanero-Rodríguez *et al.*, 2018).

Entre las principales plantas consumidas por estos pueblos originarios se encuentran las hojas de la jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*), por su contenido de polifenoles (Quiroz Suxe, 2018); las hojas del zapote blanco (*Casimiroa edulis*), por su contenido de alcaloides, en especial al N-Ndimetil-histamina (Martínez, 2006); las hojas del árbol de lima (*Citrus limetta*) y mirto (*Salvia elegans*) por su contenido de flavonoides (Jiménez-Ferrer *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2010); la corteza del guásimo (*Guazuma ulmifolia*) y del pongolote, palo de rosa amarilla o mirasol (*Cochlospermum vitifolium*) por su contenido de flavonoides (Ayarza *et al.*, 2020; Sánchez-Salgado *et al.*, 2010); y las raíces de la calaverita (*Laelia anceps*) por su contenido de estilbenos (polifenol) y fenantrenos (compuesto aromático) (Esquivel *et al.*, 2012; Vergara-Galicia *et al.*, 2013). González *et al.* (2007) describieron seis especies vegetales de la flora medicinal mexicana utilizadas como tratamiento para la HTA por pueblos originarios: toronjil blanco o morado (*Agastache mexicana*), propiedad antihipertensiva asociada a su contenido de flavonoides y triterpenos (Cruz, 2019); la magnolia (*Magnolia sp.*), por sus compuestos fenólicos (Montoya, 2005); el quelite espinoso o chayote (*Sechium edule*) por su contenido de fitoesteroles, (Moreno Valladares, 2010); flor de manita o mano de león (*Chiranthodendron pentadactylon*) y toronjil chino o azul (*Dracocephalum moldavica*), por su contenido de compuestos fenólicos (Alemán, 2010; Yang *et al.*, 2014); y pega ropa (*Desmodium grahami*), cuyo compuesto activo es desconocido. Por último, los *o'odham* utilizan el chiltepín (*Capsicum annum var. baccatum* L.), planta de la cual utilizan los frutos o chiles y los consumen crudos, cocidos o en bebida (Reina, 1993); su compuesto bioactivo del chiltepín más descrito es la capsaicina (Sanati *et al.*, 2018). El modo de empleo de las plantas mencionadas para el tratamiento de hipertensión es por infusión o cocción (Conafor, 2010).

Debido a que la HTA se considera una enfermedad asintomática o derivada de otras enfermedades, la población desconoce que la padece o bien puede llegar a confundirla con otra enfermedad; por tanto, la

información sobre el uso de la medicina tradicional para la HTA como tal se pierde entre el desconocimiento y confusión de que se padece la enfermedad y, al igual que en la DM, es importante aplicar estrategias que permitan valorar el uso del conocimiento de los pueblos originarios para coadyuvar o ser el tratamiento en el manejo de la HTA para los integrantes de los pueblos originarios.

Obesidad y dislipidemias

La OMS define a la obesidad como una acumulación excesiva de tejido adiposo, que se indica por medio del índice de masa corporal (IMC), el cual se obtiene al dividir el peso en kilogramos de la persona sobre su altura en metros, elevada al cuadrado. El sobrepeso se define como el IMC de 25 a 29.9 kg/m²; la obesidad grado I con un IMC de 30 a 34.9 kg/m²; la obesidad grado II con IMC de 35 a 39.9 kg/m², y la obesidad severa o grado III cuando el IMC se encuentra entre 40 y 49.9 kg/m² (OMS, 2018). La obesidad es una enfermedad crónica que es un factor de riesgo para desarrollar DM tipo 2, HTA, dislipidemias, enfermedades cardiovasculares, apnea del sueño, etc. (Barrera-Cruz *et al.*, 2013). Se ha encontrado que la mortalidad por enfermedades cardiovasculares es 50% mayor en personas con obesidad grado I y II, y hasta 90% en personas con obesidad grado III (Mechanick *et al.*, 2008).

La dislipidemia es un trastorno que se caracteriza por una elevada concentración de lípidos en sangre, como colesterol LDL (colesterol de baja densidad), partículas LDL densas y pequeñas y triglicéridos, además de una disminución de colesterol HDL (colesterol de alta densidad) (Cuevas y Alonso, 2016). Las dos formas más importantes de dislipidemias son la hipercolesterolemia y la hipertrigliceridemia (Lozano, 2005). Esta enfermedad se considera un factor de riesgo importante para el desarrollo de aterosclerosis, la cual es una enfermedad que engloba a las cardiopatías coronarias y se caracteriza por el depósito de lipoproteínas y colesterol en el espacio subendotelial de las arterias de mediano y grueso calibre (Ascaso y Carmena, 2015). De acuerdo con la OMS, la aterosclerosis es la principal causa de muerte e incapacidad prematura en las sociedades de países desarrollados, responsable de más de 17 millones de

muertes al año (Lozano, 2005; Naghavi *et al.*, 2015). Para 2030, se espera que este número ascienda a 23.6 millones (Mozaffarian *et al.*, 2015). De acuerdo con el Inegi, durante 2019 la principal causa de muerte fueron las enfermedades del corazón, con 156 041 defunciones (Inegi, 2019).

De acuerdo con la Ensanut 2018, en México la prevalencia de obesidad en población de 5 a 11 años fue de 17.5%; para población de 12 a 19 años, la prevalencia fue de 14.6%; y en población de 20 y más años, la prevalencia fue de 36.1% (Secretaría de Salud *et al.*, 2018). Entre las entidades del Altiplano mexicano con mayor porcentaje de obesidad en población de 12 a 19 años, están Sonora (22.2%), Baja California Sur (18.6%) y Baja California (18.3%). En un estudio con mujeres rarámuris en edad reproductiva, se reportó una prevalencia de 52.2% de sobrepeso (Monárrez-Espino y Greiner, 2000). Otro estudio reportó años después una prevalencia de sobrepeso y obesidad de 14 y 0% en el grupo de edad de 12-15 años, y de 11.8 y 2% en el grupo de 15-19 años; mientras que para niños de entre 10-14 años se encontraron prevalencias de 5.1 y 0.6% de sobrepeso y obesidad (Monárrez-Espino, 2009). Otro más reportó una prevalencia de 22% en sobrepeso más obesidad en niños rarámuris de zonas urbanas (Balcaza *et al.*, 2010). Al respecto, un estudio encontró que el porcentaje de sobrepeso y obesidad en niños rarámuris fue 10% mayor que en los niños que habitaban zonas urbanas (Benítez-Hernández *et al.*, 2014). En un estudio más reciente, realizado en la comunidad rarámuri El Oasis, se encontró una prevalencia de sobrepeso y obesidad del 70% en personas de entre 18-73 años (Manzanero-Rodríguez *et al.*, 2018), una cifra alarmante.

La Ensanut 2018 reportó una prevalencia de dislipidemias en población mexicana de veinte años y más de 19.5%, mientras que el 30.4% de la población mexicana mayor de veinte años presenta hipercolesterolemia (Secretaría de Salud *et al.*, 2018). Hoy en día no existe información actualizada acerca de la prevalencia de dislipidemias o niveles de colesterol y triglicéridos alterados en pueblos originarios del norte de México. Sin embargo, estudios sobre síndrome metabólico (SxMet) llevados a cabo en los *comcaac* reportaron niveles promedio de triglicéridos de 122 mg/dl, de colesterol HDL de 48 mg/dl y de colesterol total de 194 mg/dl (Reyes, 2014). En el caso de los *o'odham*, en 2010 se encontró un promedio de 164.7 mg/dl para triglicéridos (Riestra, 2013).

Tratamiento

En México, entre los principales fármacos para tratar la obesidad están el orlistat, que es un inhibidor de la absorción de grasas provenientes de la dieta; y la liraglutida, que controla la liberación de insulina y glucagón en las células del páncreas (Ferreira-Hermosillo y Salame-Khoury, 2018). En el caso de la dislipidemia, entre los fármacos utilizados están las estatinas, una clase de medicamentos inhibidores de la enzima responsable de la síntesis de colesterol y otros lípidos; y los fibratos, una clase de medicamentos que aumentan la oxidación de ácidos grasos en el hígado y el músculo, mediante la disminución de la síntesis de triglicéridos (Lozano, 2005).

Entre las especies medicinales de los *pa ipai* (grupo étnico con presencia en Baja California), está el moronel o madreSelva (*Lonicera subspicata* var. *Johnstonii*), de la cual utilizan sus tallos y hojas (Cortés, 2013). Dentro de la medicina tradicional del centro y norte de América, existen otras especies de madreSelva de las cuales se ha reportado que contienen compuestos bioactivos, como fenoles, flavonoides y antocianinas, que poseen propiedades antiobesogénicas, así como hipolipemiantes mediante la activación de proteínas relacionadas con la homeostasis del colesterol, promoviendo la síntesis de HDL y disminuyendo la lipogénesis hepática (Kim *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019). Otra de las especies medicinales de los *pa ipai* es el nopal *Opuntia phaeacantha* (Cortés, 2013). El género *Opuntia* se ha asociado con efectos positivos en enfermedades cardiovasculares por su alto contenido de fibra dietética, como pectina, y otras sustancias fitoquímicas (Astello-García *et al.*, 2015). Se ha reportado que el consumo de los frutos de *Opuntia* puede reducir significativamente los niveles séricos de colesterol en poblaciones con dislipidemias (Palumbo *et al.*, 2003; Wolfram *et al.*, 2002). Estos autores han propuesto que el efecto hipolipemiante del género *Opuntia* se debe a que su alto contenido de fibra puede alterar la tasa de absorción y retrasa la circulación entero-hepática de lípidos.

Por su parte, los *kumiai*, con presencia en Baja California y pueblo originario de la familia etnolingüística yumana, con mayor presencia en la región, utilizan las hojas del saúco (*Sambucus nigra*) como depurativo para las toxinas de la sangre, entre otras enfermedades (Cardoza, 2012).

Esta planta se ha utilizado en etnias tanto europeas como americanas como parte de su medicina tradicional, y se ha visto que es una de las fuentes más ricas de antocianinas, compuestos polifenólicos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Farrell *et al.*, 2015). Estudios en ratones han demostrado que el fruto de esta planta puede disminuir el contenido de triglicéridos y de colesterol, además de disminuir la inflamación sistémica y la resistencia a insulina (Farrell *et al.*, 2015). También utilizan el olivo (*Olea europea L.*), del cual emplean las hojas para preparar infusiones y tratar la hipercolesterolemia e HTA (Cardoza, 2012). En investigaciones con extractos acuosos de las hojas de esta planta, se ha visto su capacidad de reducir significativamente los niveles de triglicéridos y de lipoproteína de muy baja densidad (VLDL) (Cheurfa *et al.*, 2019). También se encontró que este extracto es un potente antioxidante. En pacientes hipertensos, el consumo de extractos de hoja de olivo redujo de forma significativa sus valores de triglicéridos, colesterol total, LDL; además de IL-8 (Interleucina 8), una molécula proinflamatoria (Lockyer *et al.*, 2017). También el uso de los frutos de este árbol, las aceitunas, tienen efectos benéficos contra enfermedades cardiovasculares debido principalmente a que son ricas en grasas monoinsaturadas, como el ácido oleico, además de ricas en fibra y vitamina E, potente antioxidante (Rocha *et al.*, 2020). Otra planta que utilizan los *kumiai* en su medicina tradicional es la manzanilla (*Matricaria chamomilla*), para una gran variedad de afecciones, entre las cuales se encuentra la reducción del colesterol (Cardoza, 2012). La manzanilla contiene compuestos activos, como hidratos de carbono, mucílago, vitamina C; algunos ácidos orgánicos, como ácido salicílico, y alcoholes, como el farnesol (Gómez *et al.*, 2015). En un estudio, el agregar aceite de manzanilla a células madre de tejido adiposo diferenciadas a células pancreáticas productoras de insulina aumentó significativamente la secreción de insulina y disminuyó los niveles de colesterol total, LDL y HDL (Fazili *et al.*, 2020). Las ramas de manrubio (*Marrubium vulgare*), cuyo compuesto activo es la marrubiina, también son utilizadas en infusión, y se ha comprobado que los extractos de las ramas pueden disminuir los niveles plasmáticos de lípidos, LDL, colesterol total y, por tanto, ser benéfica en el tratamiento de la hiperlipidemia (Ibrahim *et al.*, 2016), así como para evitar el progreso a otras enfermedades, como DM (Cardoza, 2012).

El matarique (*Psacalium decompositum*) es una planta utilizada en la medicina tradicional del pueblo *o'odham*, con la cual se preparan infusiones, principalmente con el tallo, para tratar diversas enfermedades, entre ellas obesidad, y para purificar la sangre (Reina y López, 1993). Estudios sobre oligosacáridos extraídos de la raíz de esta planta han documentado efectos hipoglucemiantes en modelos animales. En un estudio posterior, el uso de estos oligosacáridos disminuyó el peso corporal, el colesterol, los triglicéridos y algunas citocinas proinflamatorias (Merino-Aguilar *et al.*, 2014). Hay varios estudios en animales y algunos en humanos en los que demuestran que los chiles chiltepín (*Capsicum annum var. baccatum* L.) que contienen capsaicina, responsable de la sensación caliente en la lengua, tiene efectos antilipidémicos, antidiabéticos, antihipertensivos y antiobesogénicos (Sanati *et al.*, 2018). En todas las ECDNT, es importante tomar en cuenta el tratamiento o el manejo de cada una de estas patologías, no siendo la excepción la obesidad, y que pueda verse un efecto positivo en que el conocimiento de la medicina tradicional de los pueblos originarios puedan ser aplicado en el tratamiento o control de sus habitantes con ECDNT y sea parte integral de sistemas de salud.

SÍNDROME METABÓLICO (SxMET)

El síndrome metabólico (SxMet) es un conjunto de anomalías metabólicas que se describen como un conjunto de alteraciones que son la antesala para el desarrollo de DM, HTA, obesidad, hiperlipidemia y enfermedades cardiovasculares, definidas como síndrome plurimetabólico. De acuerdo con la Federación Internacional de Diabetes (IDF, por sus siglas en inglés), el SxMet se define como un nivel de triglicéridos ≥ 150 mg/dl, un nivel de colesterol HDL < 40 mg/dl en hombres y < 50 mg/dl en mujeres, una presión arterial $\geq 130/85$ mm Hg, una glucemia en ayunas ≥ 100 mg/dl y un perímetro de cintura específico para cada población (por ejemplo, caucásicos: ≥ 94 cm para hombres y ≥ 80 en mujeres) (Alberti *et al.*, 2009). Se necesitan por lo menos la presencia de tres alteraciones para diagnosticar el SxMet. También puede definirse como un conjunto de factores de riesgo para el desarrollo de enfermedades cardiovasculares asociadas a la obesidad abdominal y a la resistencia a la insulina (Villalobos *et al.*, 2017).

En el país (González-Chávez *et al.*, 2008), se reportó que la prevalencia de SxMet en adultos con una edad promedio de 38 años fue de 46.5, 43.3 y 36.5%, de acuerdo con los criterios del tercer panel para el tratamiento para adultos (ATP-III, por sus siglas en inglés), IDF y OMS, respectivamente. En Nuevo León, encontraron una prevalencia de SxMet en jóvenes de entre 10 y 19 años, de 9.4%, de acuerdo con los criterios de la ATPIII (Cárdenas-Villarreal *et al.*, 2010). En 2015 se reportó una prevalencia de SxMet entre 37.5 y 54.5% en la población infantil de Guadalajara (7-13 años) (Romero-Velarde *et al.*, 2016). En el mismo año, en la ciudad de México se reportó una prevalencia de SxMet en jóvenes de entre 17 y 24 años, de 13.4% y de 36.4%, en pacientes mayores de 16 años con esclerosis sistémica (Peralta-Amaro *et al.*, 2015; Murguía-Romero *et al.*, 2015).

En estudios realizados en pueblos originarios, durante un seguimiento de quince años (1995-2010), se reportó una prevalencia de SxMet en *o'odham*, de 41% (ATP-III-2001) (Riestra y Esparza, 2013). Utilizando diferentes criterios y sus actualizaciones, se han reportado las prevalencias de SxMet en *o'odham* de Maycoba, Sonora, de 37.1% (OMS-1999), de 49.0% (ATP-III-2009) y de 54.4% (IDF-2009); con una prevalencia mayor en mujeres que en hombres (Peñuñuri, 2015). En los *comcáac*, se encontró una prevalencia de 35% de SxMet en adultos mayores de 20 años (ATP-III-2005), de 41% (IDF-2009) y de 38%, utilizando el criterio de la Asociación Latinoamericana de Diabetes (ALAD-2010) (Reyes, 2014). En todos los casos, las mujeres presentaron una mayor prevalencia de SxMet en comparación con los hombres.

La prevalencia de las ECDNT ha ido en aumento en el país; sin embargo, actualmente no existen datos oficiales de la situación epidemiológica de estas enfermedades en pueblos originarios. Por otro lado, los estudios son escasos en los pueblos originarios del norte, donde urge una comprensión integral de estas comunidades por medio de la participación de actores locales para diseñar y aplicar mejores estrategias de salud locales y regionales.

Tratamiento

Con respecto al tratamiento farmacológico, éste reúne todos los fármacos utilizados para cada factor de riesgo por separado. Por ejemplo, para la hiperglucemia, se utiliza metformina, y para la hipertrigliceridemia, se utiliza bezafibrato (OMS, 2018; Villalobos *et al.*, 2017).

En cuanto al manejo de esta patología con la medicina tradicional, se ha descrito, por ejemplo, que los rarámuris utilizan el tallo de la marihuana (*Cannabis sativa*) para limpiar la sangre (Cardenal, 1993). Estudios llevados a cabo con esta planta han encontrado que los extractos de *cannabis* ricos en THC (tetrahidrocannabinol) mejoran la sintomatología de la enfermedad de hígado graso no alcohólico relacionado con el SxMet (Assa-Glazer *et al.*, 2020). También, el uso de *cannabis* se ha asociado con niveles bajos del IMC, una menor relación del índice cintura-cadera, menores niveles de triglicéridos, menor resistencia a insulina y presión sanguínea, además de una menor presencia de los criterios utilizados para diagnosticar SxMet, lo que disminuye el riesgo a desarrollar enfermedades del corazón y metabólicas (Meier *et al.*, 2019).

IMPACTO DEL CAMBIO EN EL ESTILO DE VIDA DE LOS GRUPOS INDÍGENAS

Las ECDNT se han relacionado directamente con estilos de vida sedentarios, dietas no saludables, mala nutrición, consumo de alcohol, desempleo y falta de acceso a la educación (Camhi *et al.*, 2015; Cardona *et al.*, 2017; Villarini *et al.*, 2015).

Para ilustrar lo anterior, en la década de los setenta se observaba que la dieta de los rarámuris era rica en proteínas y fibra, y que la combinación con una alta actividad física producía una población saludable (Cerqueira *et al.*, 1979). Por otro lado, se describió que la dieta de los rarámuris propicia la disminución de lípidos en sangre, y los niveles de colesterol de esta población se correlacionan positivamente con el consumo de colesterol en los alimentos, por lo cual enfermedades como la HTA y la obesidad estaban casi ausentes (Connor *et al.*, 1978). Sin embargo, tras varios años de estudio sobre los impactos de dietas altas

en grasa en los rarámuris, McMurry adelantó que si esta comunidad continuara con una dieta hipercalórica, sus niveles de lípidos en sangre aumentarían drásticamente y los llevaría a desarrollar enfermedades cardiovasculares (McMurry *et al.*, 1991). En una entrevista realizada durante los años 2001-2005, el hospital de Guachochi no tenía reportes de casos de DM o HTA debido al estilo de vida de los rarámuris y a su dieta tradicional, basada en cereales, frutas y verduras (Acuña-Delgado, 2010). Sin embargo, ahora se ha visto una transición en este tipo de dieta debido a cambios en los estilos de vida, que obligan a los integrantes de los pueblos originarios a migrar en búsqueda de trabajo a zonas urbanas, en las cuales su dieta se basa en alimentos industrializados altos en grasas y azúcares, las cuales promueven la aparición de los primeros casos de DM y enfermedades del corazón.

Otros estudios describen cambios en los estilos de vida de los grupos étnicos de Sonora y Chihuahua, como los yaquis, yoremes, *o'odham*, *warihó* y *macurawe*, que han ocasionado el aumento en el consumo de alimentos con alto contenido calórico y la disminución de actividad física (Haro, 1996; Palacios, 2010). Esto ha ocasionado que los casos de obesidad aumenten en estas poblaciones y que presenten un mayor riesgo a desarrollar enfermedades como HTA y DM. Una de las causas del aumento de la prevalencia de las ECDNT en grupos originarios son los cambios en los estilos de vida por la migración a otros ambientes. Se ha visto que *o'odham* residentes de Estados Unidos, acostumbrados a una sociedad industrializada, presentan mayor prevalencia mundial de DM tipo 2; cinco veces mayor a la prevalencia reportada en *o'odham* residentes de México (Schulz *et al.*, 2006). La dieta de los *o'odham* estadounidenses se caracterizaba por poca fibra y alto consumo de grasas saturadas. Y debido a que estos dos grupos provienen de un mismo origen genético, los autores del estudio sugieren que los cambios en las prevalencias se deben a factores externos, como el estilo de vida. También, los autores señalaron que cada vez es más común ver tiendas que ofrecen productos industrializados, los cuales pudieran tener un impacto en los hábitos dietarios de los *o'odham* mexicanos, además de que éstos realizan menor actividad física.

Desde una perspectiva antropológica, la teoría de la cronicidad explica cómo la transición socioeconómica, por ejemplo, de una agricultura tradicional hacia una industrializada, ocasiona una menor salud

metabólica debido a una disminución en la actividad física, un aumento en el consumo de comida alta en grasas y la constante exposición a riesgos psicosociales en ambientes urbanos. Todos estos factores de riesgo, como una mayor industrialización, globalización, urbanización, sedentarismo y sobreconsumo de alimentos procesados, han contribuido a que en la sociedad actual, de la cual los pueblos originarios no son ya la excepción, la incidencia de las ECDNT siga en aumento (Manderson, 2010; Wiedman, 2012; 2010).

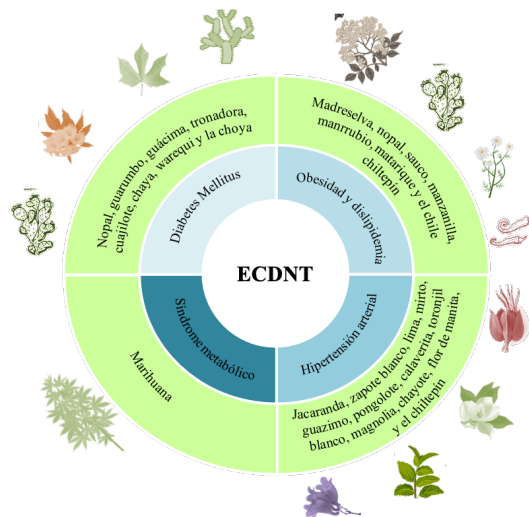
CONCLUSIÓN Y TENDENCIAS FUTURAS

Las ECDNT pasaron de estar en segundo lugar en mortalidad en México en la década de los setenta a primer lugar en la actualidad, asociado al consumo de alimentos ricos en azúcares, grasas saturadas y sal, tabaquismo, alcoholismo, sedentarismo y otros cambios del estilo de vida relacionados con la urbanización y la industrialización aceleradas. Estos cambios amenazan la transmisión del conocimiento tradicional (CT) de los pueblos originarios, el cual es resultado del vínculo entre la comunidad y su territorio, que fortalece la unión colectiva y la conservación de los recursos naturales. Debido al rápido desarrollo tecnológico, algunas costumbres locales, como el uso y conocimiento de especies comestibles y medicinales, van quedando en el olvido. Además de ocasionar la degradación de la biodiversidad, el actual modelo de desarrollo degrada la diversidad cultural. La dieta tradicional surge del CT como parte de la memoria colectiva o identidad cultural de una comunidad, pues en ella se expresan relaciones socioeconómicas y actos cargados de simbolismo (García, 2015). La alimentación de la población mexicana en sus orígenes se ha basado en una dieta tradicional variada y saludable que ha sido abandonada por el proceso de migración e industrialización, para dar paso gradual a una dieta compuesta por alimentos procesados de grasa saturadas, azúcares y sal (Gálvez y Bourges, 2012). En contraste, el consumo de alimentos como el maíz y aquellos procedentes de la milpa ha disminuido, lo que pone en riesgo la salud de la población. Gálvez y Peña (2015) mencionan que si se lograra reincorporar la dieta tradicional mexicana a la actual dieta, la población se beneficiaría de un mayor

consumo de fibra, vitaminas, minerales y fitoquímicos esenciales en la prevención de enfermedades como obesidad y DM.

Al realizar este capítulo, se pudo comprobar que la información disponible de estas enfermedades en los habitantes del desierto mexicano carece de precisión y actualización de datos, lo que impide conocer cifras exactas de su prevalencia. Como se observa en la figura 1, para los diferentes pueblos originarios, por muchos años y hasta el día de hoy, la medicina tradicional ha sido su principal método de prevención o control de las ECDNT, y no sólo por tradición, sino también porque el tratamiento farmacológico y los cambios de hábitos pueden llegar a ser un proceso complejo de difícil acceso y alto costo. Además, la deficiencia en la atención y prevención por parte del sector salud y otras organizaciones a estas comunidades facilita un descontrol de las ECDNT, lo cual afecta de forma directa en la población y la calidad de vida de quienes las padecen. Por ello, es necesaria la colaboración multisectorial en el diseño de estrategias y políticas públicas para la prevención y control de las ECDNT.

FIGURA 1



Prevalencia de enfermedades crónico degenerativas y coadyuvantes en el tratamiento tradicional en el desierto de México. Las tonalidades en azul hacen referencia a los porcentajes de la prevalencia de las enfermedades crónico degenerativas (ECDNT) en los estados del norte de México.

Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

- ACEVES, B., Ingram, M., Nieto, C., de Zapien, J. G., y Rosales, C. (2021). “Non-communicable disease prevention in Mexico: policies, programs and regulations”, *Health Promotion International*, 35(2), 409-421).
- ACUÑA-DELGADO, A. (2010). “Salud y enfermedad rarámuri: en torno a las prácticas de curanderismo”, *Revista de Antropología Experimental*, 0(10), 1-23.
- ALARCÓN-AGUILAR, F. J., Campos-Sepúlveda, A. E., Xolalpa-Molina, S., Hernández-Galicia, E., y Román-Ramos, R. (2002). “Hypoglycaemic activity of *Ibervillea sonora* roots in healthy and diabetic mice and rats”, *Pharmaceutical Biology*, 40(8), 570-575.
- ALBERTI, K. G. M. M., Eckel, R. H., Grundy, S. M., Zimmet, P. Z., Cleeman, J. I., Donato, K. A., Fruchart, J. C., James, W. P. T., Loria, C. M., y Smith, S. C. (2009). “Harmonizing the metabolic syndrome: a joint interim statement of the international diabetes federation task force on epidemiology and prevention; National Heart, Lung, and Blood Institute; American Heart Association; World Heart Federation; International Atherosclerosis Society; and International Association for the Study of Obesity”, *Circulation*, 120(16), 1640-1645.
- ALEMÁN, J. A. (2010). *Lectinas de la flor de manita (Chiranthodendron pentadactylon) purificación y su función vasorelajadora*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- ALONSO-CASTRO, A. J., y Salazar-Olivo, L. A. (2008). “The anti-diabetic properties of *Guazuma ulmifolia* Lam are mediated by the stimulation of glucose uptake in normal and diabetic adipocytes without inducing adipogenesis”, *Journal of Ethnopharmacology*, 118(2), 252-256.
- ALVARADO OSUNA, C., Milian-Suazo, F., y Valles-Sánchez, V. (2001). “Prevalencia de diabetes mellitus e hiperlipidemias en indígenas otomíes”, *Salud Publica de Mexico*, 43(5), 459-463.
- ASCASO, J. F., y Carmena, R. (2015). “Importancia de la dislipidemia en la enfermedad cardiovascular: un punto de vista”, *Clinica e Investigacion en Arteriosclerosis*, 27(6), 301-308.

- ASSA-GLAZER, T., Gorelick, J., Sela, N., Nyska, A., Bernstein, N., y Madar, Z. (2020). “*Cannabis* extracts affected metabolic syndrome parameters in mice fed high fat/cholesterol diet”, *Cannabis and Cannabinoid Research*, 5(3), 202-214.
- ASTELLO-GARCÍA, M. G., Cervantes, I., Nair, V., Santos-Díaz, M. del S., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., Negre-Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros-Zevallos, L., y Barba de la Rosa, A. P. (2015). “Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia scultivars* with different domestication gradient”, *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 119-130.
- AYALA, P., Calvo, C., Herrada, M., López Fiallo, M., y Tezanos, R. (2002). “Farmacología. Tratamiento farmacológico de la diabetes mellitus”, *Offarm: Farmacia y Sociedad*, 21(10), 120-124.
- AYARZA, T., Aranda, J., Villacrés, J., Núñez, L., y González, G. (2020). “Efecto antidiabético de los extractos liofilizados de *Guazuma ulmifolia* Lam., *Dracontium lorentense* Krause, *Physalis angulata* L., y *Handroanthus obscurus* (Bureau & K. Schum) Mattos, mediante la inhibición in vitro de la alfa α -glucosidasa”, *Revista Peruana de Medicina Integrativa*, 5(1), 5-11.
- BALCÁZA, M., Pasquet, P., y Garine, I. de. (2010). “Dieta, actividad física y estado de nutrición en escolares tarahumaras, México”, *Revista Chilena de Salud Pública*, 13(1), 30-37.
- BARBA, J. R. (2018). “México y el reto de las enfermedades crónicas no transmisibles. El laboratorio también juega un papel importante”, *Rev. Latinoam. Patol. Clín. Méd. Lab.*, 65(1), 4-17.
- BARRERA-CRUZ, A., Rodríguez-González, A., y Molina-Ayala, M. A. (2013). “The current state of obesity in Mexico”, *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 51(3), 292-299.
- BENÍTEZ-HERNÁNDEZ, Z. P., Hernández-Torres, P., Cabañas, M. D., de la Torre-Díaz, M. D. L., López-Ejeda, N., Marrodán, M. D., y Cervantes-Borunda, M. (2014). “Body composition, nutritional status and diet in rural and urban Tarahumara schoolchildren in Chihuahua, México”, *Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria*, 34(2), 71-79.
- BENNETT, P. H., Burch, T. A., y Miller, M. (1971). “Diabetes mellitus in American (PIMA) indians”, *The Lancet*, 298(7716), 125-128.

- BRITO-ZURITA, O. R., Jorge-Plascencia, B., Armenta-Llanes, O., Exiga-González, E. B., Domínguez-Banda, A., Sabag-Ruiz, E., y Ornelas-Aguirre, J. M. (2012). “Factores de riesgo para hipertensión arterial en escolares del noroeste de México”, *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, 55(6), 11-20.
- CADENA-ZAMUDIO, J. D., Nicasio-Torres, M. del P., Guerrero-Analco, J. A., y Ibarra-Laclette, E. (2018). “Estudios etnofarmacológicos de *Cecropia obtusifolia* (Urticaceae) y su importancia en el tratamiento de la diabetes mellitus tipo 2 (DM-2): una mini-revisión”, *Acta Botánica Mexicana*, 126, e1361.
- CALAZANS, J. A., y Queiroz, B. L. (2020). “The adult mortality profile by cause of death in 10 Latin American countries (2000-2016)”, *Revista Panamericana de Salud Publica/Pan American Journal of Public Health*, 44, 1-9.
- CAMHI, S. M., Crouter, S. E., Hayman, L. L., Must, A., y Lichtenstein, A. H. (2015). “Lifestyle behaviors in metabolically healthy and unhealthy overweight and obese women: a preliminary study”, *PLoS ONE*, 10(9), e0138548.
- CAMPOS-NONATO, I., Hernández-Barrera, L., Flores-Coria, A., Gómez-Álvarez, E., y Barquera, S. (2019). “Prevalencia, diagnóstico y control de hipertensión arterial en adultos mexicanos en condición de vulnerabilidad”, *Resultados de la Ensanut 100k. Salud Pública de México*, 61(6), 888-897.
- CARDENAL, F. (1993). *Remedios y prácticas curativas en la Sierra Tarahumara*. Universidad de Texas / Editorial Camino.
- CÁRDENAS-VILLARREAL, M. V., López-Alvarenga, J. C., Bastarrachea, R. A., Rizo-Baeza, M., y Cortés-Castell, E. (2010). “Prevalencia del síndrome metabólico y sus componentes en adolescentes de la ciudad de Monterrey, Nuevo León”, *Arch. Cardiol. Mex. Col. Mitras Centro*, 80(115), 19-26.
- CARDONA, S., Guzmán, L., y Cardona-Arias, J. A. (2017). “Systematization of clinical trials related to treatment of metabolic syndrome, 1980-2015”, *Endocrinología, Diabetes y Nutrición* (English ed.), 64(2), 82-91.

- CARDOZA, M. A. (2012). *Algunas plantas medicinales de la comunidad indígena de los kumiai, norte de Baja California*. La Paz, BCS, México, TlahuiEdu AC. 1-18.
- CASTRO-JUÁREZ, A. A., Serna-Gutiérrez, A., Lozoya-Villegas, J., De, I., Toledo-Domínguez, J., Díaz-Zavala, R. G., y Esparza-Romero, J. (2018). "Prevalence of previous diagnosis of hypertension and associated factors in the Yaqui indigenous of Sonora", *Revista Mexicana de Cardiología*, 29(2), 90-97.
- CERQUEIRA, M. T., Fry, M. M., y Connor, W. E. (1979). "The food and nutrient intakes of the Tarahumara indians of Mexico", *American Journal of Clinical Nutrition*, 32(4), 905-915.
- CHANG, A. Y., Cullen, M. R., Harrington, R. A., y Barry, M. (2020). "The impact of novel coronavirus covid-19 on noncommunicable disease patients and health systems: a review", *Journal of Internal Medicine*, 289(4), 450-462.
- CHEURFA, M., Abdallah, H. H., Allem, R., Noui, A., Picot-Allain, C. M. N., y Mahomoodally, F. (2019). "Hypocholesterolaemic and antioxidant properties of *Olea europaea* L. leaves from Chlef province, Algeria, using in vitro, in vivo and in silico approaches", *Food and Chemical Toxicology*, 123, 98-105.
- CIAD (2020). "La pandemia de diabetes en México". Nota. México: Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo.
- CONAFOR (2010). *Plantas medicinales de la Farmacia Viviente del Cefofor: usos terapéuticos tradicionales y dosificación*. México: Comisión Nacional Forestal.
- CONNOR, W. E., Cerqueira, M. T., Connor, R. W., Wallace, R. B., Malinow, M. R., y Casdorff, H. R. (1978). "The plasma lipids, lipoproteins, and diet of the Tarahumara indians of Mexico", *American Journal of Clinical Nutrition*, 31(7), 1131-1142.
- CORTÉS, E. A. (2013). *Conocimiento tradicional herbolario pa ipai y perspectiva de desarrollo local en Santa Catarina, B.C.* Universidad Autónoma de Baja California.
- CRUZ, K. C. (2019). *Caracterización farmacológica del extracto hidroalcohólico de Agastache mexicana en modelos murinos de diabetes, obesidad e hipertensión*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

- CUEVAS, M., A., y Alonso K, R. (2016). “Dislipidemia diabética”, *Revista Médica Clínica Las Condes*, 27(2), 152-159.
- ESQUIVEL, E. R., Noriega, R., Bello, M. A., Saavedra, A., y Salgado, R. (2012). “Plantas utilizadas en la medicina tradicional mexicana con propiedades antidiabéticas y antihipertensivas/Biological activity of medicinal plants and edible fruits View project”, *Biológicas*, 14(1), 45-52.
- FARRELL, N. J., Norris, G. H., Ryan, J., Porter, C. M., Jiang, C., y Blesso, C. N. (2015). “Black elderberry extract attenuates inflammation and metabolic dysfunction in diet-induced obese mice”, *British Journal of Nutrition*, 114(8), 1123-1131.
- FAZILI, A., Gholami, S., Sheikhpour, M., y Pousti, P. (2020). “Therapeutic effects of in vivo-differentiated stem cell and *Matricaria chamomilla* L. oil in diabetic rabbit”, *Journal of Diabetes and Metabolic Disorders*, 19(1), 453-460.
- FERREIRA-HERMOSILLO, A., y Salame-Khoury L. (2018). “Tratamiento farmacológico de la obesidad”, *Rev. Med. Inst. Mex. Seg. Soc.*, 6(4), 395-409.
- GÁLVEZ, A., y Bourges, H. (2012). “La alimentación en la Ciudad de México”, en *Los riesgos para la salud en la vida de una megametropoli. Memoria I*. México: UNAM, Facultad de Medicina, Seminario sobre Medicina y Salud, 2012, 366-403.
- GÁLVEZ, A., y Peña, C. (2015). “Revaloración de la dieta tradicional mexicana: una visión interdisciplinaria”, *Revista Digital Universitaria UNAM*, 16(5), 2-17.
- GARCÍA, P. (2015). “La alimentación de los mexicanos, cambios sociales y económicos y su impacto en los hábitos alimenticios”, *Cuadernos de Nutrición*, 38(6), 206-207.
- GÓMEZ, M., Reyes, S., y Paredes, L. (2015). “La manzanilla y sus propiedades medicinales”, *Revista de Investigación e Información En Salud*, 10(23), 54-58. <file:///C:/Users/pishe/Documents/PROYECTO/Manzanilla/Gómez, M.pdf>.
- GONZÁLEZ-CHÁVEZ, A., Simental, L., Elizondo-Argueta, S., Sánchez, Z. J., Gutiérrez, S. G., y Guerrero-Romero, F. (2008). “Prevalencia del síndrome metabólico entre adultos mexicanos no diabéticos,

- usando las definiciones de la OMS, NCEP-ATPIIIa e IDF”, *Revista Médica del Hospital General*, 71(1), 11-19.
- GONZÁLEZ, K. B. (2007). “Plantas empleadas en la medicina tradicional mexicana como fuentes potenciales de compuestos con efecto sobre el sistema cardiovascular”, Universidad Autónoma de Querétaro, 31-36.
- GUTIÉRREZ, J. (2001). “Tratamiento de la hipertensión arterial. Cambio de estilo de vida”, *Colombia Médica*, 32(2), 99-102.
- HARO, J. A., Lara, B. E., Salido, P. L., y Salazar, V. (1996). “El sistema local de salud en la región Guarijío/Makurawe de Sonora: retos y perspectivas”, *Región y Sociedad*, 7(12), 47-106.
- IBRAHIM, A. Y., Hendawy, S. F., Elsayed, A. A., y Omer, E. A. (2016). “Evaluation of hypolipidemic *Marrubium vulgare* effect in Triton WR-1339-induced hyperlipidemia in mice”, *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 9(5), 453-459.
- INEGI (2020). Estadísticas a propósito del día mundial contra la obesidad (12 de noviembre). Comunicado de prensa núm. 528/20. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2019). “Mortalidad, conjunto de datos: mortalidad general. Conjunto de datos”. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- JIMÉNEZ-FERRER, E., Hernández, F., González-Cortázar, M., Tortoriello, J., y Herrera-Ruiz, M. (2010). “Antihypertensive activity of *Salvia elegans* Vahl. (*Lamiaceae*): ACE inhibition and angiotensin II antagonism”, *Journal of Ethnopharmacology*, 130(2), 340-346.
- KIM, J. W., Lee, Y. S., Seol, D. J., Cho, I. J., Kwang Ku, S., Choi, J. S., y Lee, H. J. (2018). “Anti-obesity and fatty liver-preventing activities of *Lonicera caerulea* in high-fat diet-fed mice”, *International Journal of Molecular Medicine*, 42(6), 3047-3064.
- LIU, S., Sui, Q., Zhao, Y., y Chang, X. (2019). “*Lonicera caerulea* berry polyphenols activate SIRT1, enhancing inhibition of Raw264.7 macrophage foam cell formation and promoting cholesterol efflux”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65 (25), 7157–7166.
- LOCKYER, S., Rowland, I., Spencer, J. P. E., Yaqoob, P., y Stonehouse, W. (2017). “Impact of phenolic-rich olive leaf extract on blood

- pressure, plasma lipids and inflammatory markers: a randomised controlled trial”, *European Journal of Nutrition*, 56(4), 1421-1432.
- LOZANO, J. A. (2005). “Dislipidemias”, *OFFARM*, 24(9), 100-108.
- MANDERSON, L. (2010). “Making medical anthropology matter”, *Medical Anthropology: Cross Cultural Studies in Health and Illness*, 29(1), 1-5.
- MANZANERO-RODRÍGUEZ, D., de Casas-Rosales, M. Á., Rodríguez-Rodríguez, A. M., Castillo-Rangel, I., y Gutiérrez-Hernández, R. (2018). “Enfermedades crónico degenerativas en población del asentamiento tarahumara del estado de Chihuahua”, *Revista Salud Quintana Roo*, 11(39), 7-12.
- MATEO-RIVERA, I. A., y Jiménez-Corona, A. E. (2019). “Plantas medicinales usadas en la terapéutica de pacientes con hipertensión y diabetes mellitus tipo II, de la región indígena tepehuana”, *Ciencias Huasteca Boletín Científico de la Escuela Superior de Huejutla*, 13, 30-36.
- MARINHO, F. M., Soliz, P., Gawryszewski, V., y Gerger, A. (2013). “Epidemiological transition in the Americas: changes and inequalities”, *The Lancet*, 381, 89.
- MARTÍNEZ, M. K., y Rico Lilia, S. R. (2006). “Cultivo in vitro de cuatro diferentes tejidos de *Casimiroa edulis* Llave et Lex para identificación de alcaloides totales”, *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 37(4), 5-11.
- McMURRY, M. P., Cerqueira, M. T., Connor, S. L., y Connor, W. E. (1991). “Changes in lipid and lipoprotein levels and body weight in Tarahumara Indians after consumption of an affluent diet”, *New England Journal of Medicine*, 325(24), 1704-1708.
- MEANEY, E., Munguía, L., Nájera, N., y Ceballos, G. (2019). “Mexican epidemiological paradox: a developing country with a burden of ‘richness’ diseases. An update”. en *Encyclopedia of Environmental Health*. Elsevier, 357-369.
- MECHANICK, J. I., Kushner, R. F., Sugerman, H. J., Gonzalez-Campoy, J. M., Collazo-Clavell, M. L., Guven, S., Spitz, A. F., Apovian, C. M., Livingston, E. H., Brolin, R., Sarwer, D. B., Anderson, W. A., y Dixon, J. (2008). “American Association of Clinical Endocrinologists, The Obesity Society, and American Society for Metabolic

- & Bariatric Surgery Medical guidelines for clinical practice for the perioperative nutritional, metabolic, and nonsurgical support of the bariatric surgery patient”, *Surgery for Obesity and Related Diseases*, 17 (1), S1-70.
- MEIER, M. H., Pardini, D., Beardslee, J., y Matthews, K. A. (2019). “Associations between *cannabis* use and cardiometabolic risk factors: a longitudinal study of men”, *Psychosomatic Medicine*, 81(3), 281-288.
- MERINO-AGUILAR, H., Arrieta-Báez, D., Jiménez-Estrada, M., Magos-Guerrero, G., Hernández-Bautista, R. J., Susunaga-Notario, A. del C., Almanza-Pérez, J. C., Blancas-Flores, G., Román-Ramos, R., y Alarcón-Aguilar, F. J. (2014). “Effect of fructooligosaccharides fraction from *Psacalium decompositum* on inflammation and dyslipidemia in rats with fructose-induced obesity”, *Nutrients*, 6(2), 591-604.
- MONÁRREZ-ESPINO, J. (2009). “Salud y nutrición en adolescentes tarahumaras”, *Rev. Med. Inst. Mex. Seg. Soc.*, 47(1), 87-92.
- MONÁRREZ-ESPINO, J., & Greiner, T. (2000). “Anthropometry in Tarahumara indian women of reproductive age in northern Mexico: is overweight becoming a problem?”, *Ecology of Food Nutrition*, 39(6), 437-457.
- MONTOYA, J. V. (2005). Investigación *bibliográfica de plantas utilizadas como antihipertensoras en la región neotropical de la República Mexicana*. Universidad Nacional Autónoma del México.
- MORENO, L. (2001). “Epidemiología y diabetes”, *Rev. Fac. Med. UNAM*, 4(1), 35-37.
- MORENO-ULLOA, J., Moreno-Ulloa, A., Martínez-Tapia, M., y Duque-Rodríguez, J. (2018). “Comparison of the prevalence of metabolic syndrome and risk factors in urban and rural Mexican Tarahumara-foot runners”. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 143, 79-87.
- MORENO VALLADARES, A. del P. (2010). “*Sechium edule* (jacq.) Swartz y los fitoesteroles como agentes antihiperlipidémicos y antihipertensivos”, *Resultados de Investigación*, 3, 15-26.
- MOZAFFARIAN, D., Benjamin, E. J., Go, A. S., Arnett, D. K., Blaha, M. J., Cushman, M., de Ferranti, S., Després, J.-P., Fullerton, H. J.,

- Howard, V. J., Huffman, M. D., Judd, S. E., Kissela, B. M., Lackland, D. T., Lichtman, J. H., Lisabeth, L. D., Liu, S., Mackey, R. H., Matchar, D. B., y Turner, M. B. (2015). "Heart Disease and Stroke Statistics—2015 update", *Circulation*, 131(4), e29–e322.
- MURGUÍA-ROMERO, M., Jiménez-Flores, J. R., Sigrist-Flores, S. C., Tapia-Pancardo, D. C., Ramos-Jiménez, A., René, M. C., y Villalobos-Molina, R. (2015). "Prevalence of metabolic syndrome in young Mexicans: a sensitivity analysis on its components", *Nutrition Hospitalaria*, 32(1), 189-195.
- NAGHAVI, M., Wang, H., Lozano, R., Davis, A., Liang, X., Zhou, M., Vollset, S. E., Abbasoglu Ozgoren, A., Abdalla, S., Abd-Allah, F., Abdel Aziz, M. I., Abera, S. F., Aboyans, V., Abraham, B., Abraham, J. P., Abuabara, K. E., Abubakar, I., Abu-Raddad, L. J., Abu-Rmeileh, N. M. E., y Temesgen, A. M. (2015). "Global, regional, and national age-sex specific all-cause and cause-specific mortality for 240 causes of death, 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013", *The Lancet*, 385(9963), 117-171.
- OMS (2019). "Hipertensión". Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/hypertension>.
- OMS (2018). "Noncommunicable diseases". Organización Mundial de la Salud. www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases.
- OPS (2018). "La salud de México en cifras". Organización Panamericana de la Salud. https://Www.Paho.Org/Mex/Index.Php?Option=com_content&view=category&id=780&Itemid=310.
- PALACIOS, M. del R., Haro, J. A., y Robles, A. (2010). "La salud desde la nutrición y la alimentación en los pueblos indígenas del noroeste de México. Síntesis de literatura", en *Estudios y propuestas para el medio rural*. Puebla: Universidad Autónoma Indígena de México / Colegio de Posgraduados, Puebla, 33-55.
- PALUMBO, B., Efthimiou, Y., Stamatopoulos, J., Oguogho, A., Budinsky, A., Palumbo, R., y Sinzinger, H. (2003). "Prickly pear induces upregulation of liver LDL binding in familial heterozygous hypercholesterolemia", *Nuclear Medicine Review*, 6(1), 35-39.

- PANIAGUA-DOMÍNGUEZ, B. L., Peregrina-Sandoval, J., Velázquez-Magaña, S., Flores-Torales, E., y Orozco-Barocio, A. (2008). "Valoración de la sobrevida de ratones BALB/c inoculados con linfoma murino L5178Y y tratados con los extractos etanólico y acuoso de *Lophocereus schottii* (Engelm) Britton & Rose (cactus estrella)", *Avances en la Investigación Científica en el CUCBA*, Memorias de XIX Semana Nacional de la Investigación Científica, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA), 161-169.
- PEÑUÑURI, A. A. (2015). *Síndrome metabólico en la comunidad comcaac: prevalencia y factores asociados*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo.
- PERALTA-AMARO, A. L., Cruz-Domínguez, M. del P., Olvera-Acevedo, A., y Vera-Lastra, O. L. (2015). "Prevalence of metabolic syndrome and insulin resistance in system sclerosis", *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 53(4), 476-483.
- PÉREZ, Y. Y., Jiménez-Ferrer, E., Alonso, D., Botello-Amaro, C. A., y Zamilpa, A. (2010). "*Citrus limetta* leaves extract antagonizes the hypertensive effect of angiotensin II", *Journal of Ethnopharmacology*, 128(3), 611-614.
- QUIROZ SUXE, K. Y. (2018). *Capacidad antioxidante y cuantificación de polifenoles en corteza y hojas de jacaranda acutifolia (arabisca)*. Universidad Católica los Angeles Chimbote.
- REINA, A. L., y López, R. (1993). *Contribución a la introducción de nuevos cultivos en Sonora: las plantas medicinales de los pimas bajos del municipio de Yecora*. Universidad de Sonora.
- REYES, I. (2014). *Comparación de los criterios ATP III-2005, IDF-2009 y ALAD-2010 en el diagnóstico del síndrome metabólico en la comunidad Seri de Punta Chueca: proyecto Comcaac*. Universidad de Sonora.
- RIESTRA, M., y Esparza, J. (2013). *Evaluación de la prevalencia del síndrome metabólico después de un periodo de seguimiento de 15 años (1995-2010) en indios Pima y blancos de Maycoba, Sonora*. Universidad de la Salud.
- ROCHA, J., Borges, N., y Pinho, O. (2020). "Table olives and health: a review", *Journal of Nutritional Science*, 9, E57.

- ROLDÁN, V. A., Ojeda, C. G., y Roldán, V. E. A. (2011). “Tratamiento de la diabetes mellitus tipo 2”, *Revista de la Facultad de Medicina de la UNAM*, 54(1), 28–40.
- ROMERO-VELARDE, E., Aguirre-Salas, M. L., Álvarez-Román, A. Y., Vásquez-Garibay, M. E., Casillas-Toral, E., y Fonseca-Reyes, S. (2016). “Prevalencia de síndrome metabólico y factores asociados en niños y adolescentes con obesidad”, *Aportaciones Originales Rev. Med. Inst. Mex. Seg. Soc.*, 54 (5), 568-575.
- SANATI, S., Razavi, B. M., y Hosseinzadeh, H. (2018). “A review of the effects of *Capsicum annum* L. And its constituent, capsaicin, in metabolic syndrome”, *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 21(5), 439-448.
- SÁNCHEZ-SALGADO, J. C., Castillo-España, P., Ibarra-Barajas, M., Villalobos-Molina, R., y Estrada-Soto, S. (2010). “*Cochlospermum vitifolium* induces vasorelaxant and antihypertensive effects mainly by activation of NO/cGMP signaling pathway”, *Journal of Ethnopharmacology*, 130 (3), 477-484.
- SANTIAGO, C., Nuricumbo, V. N., Chapa, M. G., Gutiérrez, G., y Arturo, V. (2021). “Antimicrobial activity, phenolic and antioxidant content of extracts from cuajilote (*Parmentiera aculeata kunth*) fruits at different degrees of ripening”, *Journal of the Mexican Chemical Society*, 65(2), 161-169.
- SAUCEDO, M. del S., Bañuelos, N., Cabrera, R. M., y Ballesteros, M. N. (2006). “La práctica de la medicina alternativa, una realidad en el paciente diabético en Hermosillo, Son., México”, *Revista Salud Pública y Nutrición*, 7(4), 15.
- SCHULZ, L. O., Bennett, P. H., Ravussin, E., Kidd, J. R., Kidd, K. K., Esparza, J., y Valencia, M. E. (2006). “Effects of traditional and western environments on prevalence of type 2 diabetes in Pima indians in Mexico and the U.S.”, *Diabetes Care*, 29(8), 1866-1871.
- Secretaría de Salud / INEGI / INSP (2018). *Encuesta nacional de salud y nutrición 2018. Presentación de resultados*. México.
- STEFAN, N., Birkenfeld, A. L., y Schulze, M. B. (2021). “Global pandemics interconnected – obesity, impaired metabolic health and covid-19”. *Nature Reviews Endocrinology*, 17, 135-149.

- TORRES-XOCUA, L. M. (2019). *Actividad hipoglucemiante de extractos y fracciones de plantas silvestre e in vitro de Tecoma stans*. Universidad del Papaloapan.
- TRUJILLO, J., Chirino, Y. I., Martínez-Tagüeña, N., y Pedraza-Chaverri, J. (2018). "Renal damage in the metabolic syndrome (MetSx): disorders implicated", *European Journal Pharmacology*, 5(818), 554-568.
- VALENZUELA, R., Morales, M. E., Verde, M. J., Oranday, A., Preciado-Rangel, P., Antonio, J., y Esparza-Rivera, J. R. (2015). "Cnidocolus chayamansa hidropónica orgánica y su capacidad hipoglucemiante, calidad nutraceutica y toxicidad", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 815-825.
- VON GLASCOE, C. A., Camarena, L. y Arellano, M. C. E. (2009). "Estrategias para la detección temprana, control y prevención de la diabetes mellitus tipo 2 y otras enfermedades relacionadas en comunidades indígenas nativas de Ensenada, Baja California, *Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada*. <http://www.imipens.org/EXTENSO/12-CHRISTINEVON.pdf>
- VERGARA-GALICIA, J., Castillo-España, P., Villalobos-Molina, R., y Estrada-Soto, S. (2013). "Vasorelaxant effect of laelia speciosa and laelia anceps: two orchids as potential sources for the isolation of bioactive molecules", *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 3(7), 34-37.
- VILLALOBOS, A., Millán, G., y Narankievickz, D. (2017). "Síndrome metabólico", *Medicine (Spain)*, 12(42), 2485-2493.
- VILLARINI, M., Lanari, C., Barchiesi, L., Casciari, E., Tabascio, A., Castellini, M., Levorato, S., Vannini, S., Fornaciari, G., Moretti, M., y Villarini, A. (2015). "Effects of the 'preveDi' lifestyle modification trial on metabolic syndrome", *Annali di Igiene : Medicina Preventiva e di Comunità*, 27(3), 595-606.
- WIEDMAN, D. (2012). "Native American embodiment of the chronicities of modernity: reservation food, diabetes, and the metabolic syndrome among the Kiowa, Comanche, and Apache", *Medical Anthropology Quarterly*, 26(4), 595-612.

- WIEDMAN, D. (2010). "Globalizing the chronicities of modernity", en S. Manderson (ed.), *Chronic conditions, fluid states: chronicity and the anthropology of illness*. Rutgers University Press, 38-53.
- WOLFRAM, R. M., Kritz, H., Efthimiou, Y., Stomatopoulos, J., y Sinzinger, H. (2002). "Effect of prickly pear (*Opuntia robusta*) on glucose- and lipid-metabolism in non-diabetics with hyperlipidemia. A pilot study", *Wiener Klinische Wochenschrift*, 114(19-20), 840-846.
- YÁÑEZ, P. (2013). "La diabetes mellitus entre los *comcaac* de *Socaaix*, Sonora: significados, usos y razones para una epidemiología sociocultural", *Estudios de Antropología Biológica*, xvi, 1405-5066.
- YANG, L. N., Xing, J. G., He, C. H., y Wu, T. (2014). "The phenolic compounds from *Dracocephalum moldavica* L.", *Biochemical Systematics and Ecology*, 54, 19-22.

CAPÍTULO 22

PLANTAS DE ZONAS ÁRIDAS Y SU RELACIÓN CON LA DIABETES MELLITUS

ALETHIA MUÑIZ-RAMIREZ¹

ABRAHAM HERIBERTO GARCÍA CAMPOY²

RESUMEN

La diabetes mellitus (DM) es considerada un problema mundial de salud pública; tan sólo en 2019, se estimó que existían 463 millones de diabéticos, y se proyecta que en 2045 alcance una cifra de 700 millones. En México se utilizan al menos 306 especies de 235 géneros y 93 familias para tratar la diabetes (Cruz y Andrade-Cetto, 2015). En este capítulo se abordan algunas de las plantas que se pueden encontrar en la república mexicana y que se utilizan típicamente en la regulación y tratamiento de la DM y su sintomatología. Algunas de ellas ya cuentan con una amplia investigación y conocimiento de sus efectos, así como de los biocompuestos responsables de sus beneficios. Algunas de las especies de plantas que estaremos revisando en el capítulo son *Allium sativum* Linn, *Allium cepa* Linn, *Ibervillea sonora*, *Medicago sativa* Linn, *Parkinsonia aculeata*,

¹ División de Materiales Avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipicyt), San Luis Potosí, S.L.P., CP 78216. Autora de correspondencia: alethia.muniz@ipicyt.edu.mx.

² División de Biología Molecular, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipicyt). Autor de correspondencia: abrahamhgc27@hotmail.com.

Psacalium decompositum y *Tecoma stans* Linn. Las especies mencionadas fueron tomadas como una pequeña muestra de la diversidad de la flora que podemos localizar en las zonas áridas de México.

PALABRAS CLAVE: *Allium cepa* Linn, *Allium sativum* Linn, diabetes mellitus, *Ibervillea sonora*, *Medicago sativa* Linn, *Parkinsonia aculeata*, *Psacalium decompositum*, *Tecoma stans* Linn.

INTRODUCCIÓN

La diabetes mellitus (DM) es una enfermedad metabólica relacionada con afectaciones en el páncreas, el cual comienza a presentar dificultades para secretar suficiente insulina, o cuando el organismo no utiliza eficazmente la insulina que produce. El incremento en la concentración de glucosa en sangre de forma descontrolada se denomina hiperglucemia. Este exceso de carbohidratos en el cuerpo, con el tiempo, afecta gravemente células, órganos y sistemas (WHO, 2022).

La DM es considerada un problema mundial de salud pública; tan sólo en 2019, se estimó que existían 463 millones de diabéticos, y se proyecta que en 2045 alcance una cifra de 700 millones (Saeedi, *et al.*, 2019). En México, en 2019 se tuvieron más de 100 000 defunciones (International Diabetes Federation, 2019).

En 2016, la Ensanut" por "Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) reportó algunas de las afecciones ocasionadas por la diabetes, las de mayor impacto fueron visión disminuida (54.5%), daño en retina (11.19%), pérdida de la vista (9.9%), úlceras (9.14%) y amputaciones (5.5%). Esta información corresponde a lo registrado en todo México. Aunque, también en la DM se presentan dificultades renales, cardíacas, hepáticas, etc (Instituto Nacional de Salud Pública, 2016).

Por otra parte, del 100% de personas diagnosticadas con la enfermedad, solamente 85.5% recibió tratamiento médico, 80% ingiere hipoglucemiantes orales y 25% usa insulina como terapia para el control de la DM (Instituto Nacional de Salud Pública, 2016). El 14.5% de los diabéticos aún no reciben tratamiento o se encuentran utilizando remedios o tratamientos alternativos, principalmente a base plantas.

En este sentido, la medicina etnobotánica se emplea con frecuencia en México, ya que existen numerosas especies de plantas medicinales en el país. Se estima que 63% de los pacientes diabéticos utilizan medicinas complementarias y alternativas, además de los tratamientos médicos (Argáez-López *et al.*, 2003).

En México se utilizan al menos 306 especies de 235 géneros y 93 familias para tratar la diabetes (Cruz y Andrade-Cetto, 2015). En este capítulo se abordan algunas de las plantas que se pueden encontrar en la república mexicana y que son utilizadas típicamente en el tratamiento de

la diabetes mellitus y su sintomatología. Algunas de ellas ya cuentan con una amplia investigación y conocimiento de sus efectos, así como de los biocompuestos responsables de sus beneficios, razón por la cual fueron tomadas en cuenta. Cabe resaltar que es muy diverso el folclor y conocimiento que se tiene de los remedios herbolarios, ya que la biodiversidad botánica de nuestro país es muy extensa, y apenas estamos conociendo y explorando los atributos y cualidades que contienen las plantas.

Algunas de las especies de plantas que estaremos revisando en el capítulo son *Allium sativum* Linn, *Allium cepa* Linn, *Ibervillea sonora*, *Medicago sativa* Linn, *Parkinsonia aculeata*, *Psacalium decompositum* y *Tecoma stans* Linn. Las especies mencionadas se tomaron como una pequeña muestra de la diversidad de la flora que podemos localizar en las zonas áridas de México y que se emplean para mitigar las complicaciones provocadas por la DM.

ALLIUM SATIVUM LINN

El género *Allium* incluye quinientas especies perteneciente a la familia *Amaryllidaceae*. Se conoce desde hace varios siglos por su valor gastronómico, terapéutico y religioso. Entre las variedades que se han estudiado, se encuentran ajo, cebollino, cebollas, puerros, chalotes y cebolletas. Se caracterizan por poseer compuestos orgánicos azufrados, saponinas, polisacáridos y polifenoles (Kothari *et al.*, 2019). En el estado de San Luis Potosí, México, podemos encontrar algunas de las variedades del género *Allium*, entre las que destaca el ajo (*Allium sativum* Linn) y la cebolla (*Allium cepa* Linn).

El *A. sativum* Linn (ajo) tiene una larga trayectoria de uso a lo largo de la historia del hombre en diferentes culturas en el mundo; se ha usado como alimento y remedio medicinal. Se han encontrado vestigios y menciones medicinales en Egipto, Grecia, Roma, China e India. Durante décadas, se ha ido reforzando y descubriendo la gran variedad de beneficios, usos y aplicaciones medicinales para la prevención y tratamiento de problemas digestivos, respiratorios, toxicológicos, depresivos y renales, entre otros (Rivlin, 2001).

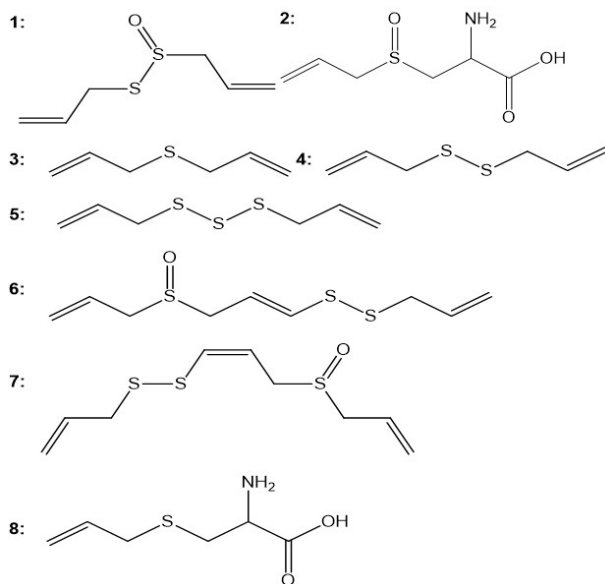
Es originario de Asia Central; lo cultivan por lo menos cincuenta naciones. En México, se produce en los estados del norte, bajo y centro. Entre las variedades que se cultivan se encuentran ajo blanco, criollo, morado, pata de perro, Taiwan o Napuri (Gómez *et al.*, 2021). Se le han identificado 33 compuestos azufrados, 17 aminoácidos, vitaminas y minerales, siendo el selenio uno de los más importantes. Pertenece a la familia de las *Alliaceae*, y es una planta bulbosa perenne (Londhe *et al.*, 2011).

Se trata de una de las plantas de zonas áridas que ha sido estudiada para el control o coadyuvante en el tratamiento de la diabetes. Se han realizados estudios en modelos murinos (ratas y ratones) diabéticos inducidos con alloxan o estreptozotocina; exalta su capacidad hipoglucemiante, antioxidante, antiglicación y cardioprotectora. También se ha reportado su acción benéfica ante afecciones en cerebro, riñones, hígado y testículos, entre otras (El-Demerdash *et al.* 2005). Los ensayos donde se administró *A. sativum* Linn para tratar la DM mostraron una mejoría en diferentes complejidades crónicas (macrovasculares, microvasculares y misceláneas) y agudas.

En 2019, Melino y colaboradores realizaron una revisión de las bondades de los compuestos organosulfurados (OSC) presentes en el ajo, donde analizaron las propiedades del H₂S como gasotransmisor de forma endógena o exógena vinculado a la DM y sus complicaciones. En este trabajo refieren el uso de plantas comestibles ricas en OSC como tratamiento alternativo para la diabetes, vinculado a sus actividades antioxidante, desinflamatoria, desintoxicante, antimicrobiana, cardiovascular, antihipertensiva, antihiperlipidémica, anticancerígena, reguladora del sistema metabólico e inmunológico, regenerativa, hepatoprotectora, neuroprotectora, etc. (Melino *et al.*, 2019; Shang *et al.*, 2019).

Entre los OSC con actividad terapéutica y que se han identificado se encuentran alicina (1), aliina (2), sulfuro de dialilo (3), disulfuro de dialilo (4), trisulfuro de dialilo (5), E-ajoeno (6), Z-ajoeno (7) y S-alil-cisteína (8) (figura 1). Además, se le han aislado saponinas (desgalactotigoninaramnosa, proto-desgalactotigonina, proto-desgalactotigoninaramnosa, voghioside D1, sativosida B1-ramosa, sativosida R1), polifenoles (β -ácido resorcilico, pirogalidol, ácido gálico, rutina, ácido proto-catechuico y quercetina) y polisacáridos (fructosa, glucosa, galactosa) (Shang *et al.*, 2019).

FIGURA 1



Compuestos organosulfurados identificados en *Allium sativum* Linn.

Fuente:

ALLIUM CEPA LINN

Allium cepa Linn., mejor conocida como cebolla, es una especia culinaria y terapéutica mundial; pertenece a la familia *Liliaceae*; su origen se ubica en Asia central. Se produce en todo el mundo; su composición química es compleja y se encuentra constituida por diferentes compuestos biológicamente activos, como ácidos fenólicos, tiosulfatos y flavonoides. La planta cuenta con una variedad de actividades farmacológicas que incluyen efectos anticancerígenos, antidiabéticos, antimicrobianos, cardiovasculares, antioxidantes, etc., por lo cual se le ha utilizado desde tiempos remotos para tratar diversas enfermedades y malestares.

La cebolla ha sido investigada por su potencial preventivo, antioxidante, antidiabético y antiinflamatorio; los ensayos *in vivo* (ratas diabéticas) han mostrado una serie de efectos favorables en diferentes órganos (hígado, riñones, cerebro, músculos, etc.) dañados por la

diabetes. También se reportó una disminución en marcadores bioquímicos (oxidación lipídica, índice glucémico, actividad de las enzimas antioxidantes) (Ahmed *et al.*, 2020), oxidación de proteínas, acumulación de especies reactivas oxidantes (ERO), triglicéridos, colesterol y aumento en la relación de colesterol HDL/colesterol total) cuantificados (Bang *et al.*, 2009) en individuos enfermos, para la identificación y desarrollo de la patología diabética asociadas a los problemas metabólicos (El-Demerdash *et al.*, 2005).

En 2010, se efectuó un estudio preclínico con pacientes diabéticos tipo I y tipo II a los cuales se les administraron 100 mg de *A. cepa Linn* en ayunas durante cuatro semanas. Los pacientes con diabetes tipo I presentaron una disminución en sus niveles de hiperglucemia en sangre. Por otro lado, los enfermos con diabetes tipo 2 tuvieron resultados prometedores al mostrar una reducción de la concentración de glucosa sanguínea después de 4 h de la administración. Dicho resultado sugiere el uso de *A. cepa* como tratamiento suplementario en el control de la glucosa en enfermos con DM (Eldin *et al.*, 2010).

En 2002, Kumari y Augusti determinaron el potencial antidiabético y antioxidante del sulfóxido de S-metil cisteína (aliína) (2), aislado de *A. cepa Linn*. Los ensayos realizados sugieren que la aliína estimula la secreción de insulina, la actividad de las enzimas SOD, CAT y el reconocimiento de glucosa (Kumari, 2002). Por ello, *A. cepa Linn* presenta resultados prometedores como tratamiento alternativo para contrarrestar la patología diabética.

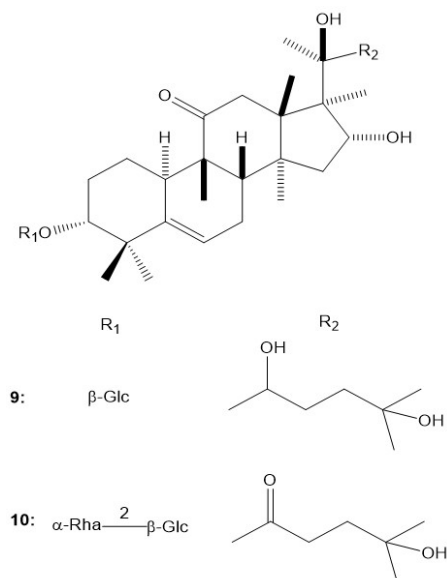
IBERVILLEA SONORAE

Ibervillea sonorae Greene (*Maximowiczia sonorae* S. Wats.), *Cucurbitaceae*, conocida localmente como “wareke” o “guareke”, es una planta dioica perenne que se distribuye en los estados de Sinaloa y Sonora, en México. Las etnias originarias de esas regiones la utilizan como remedio para las heridas dérmicas; también ha sido usada de forma empírica para el control de la diabetes. Entre sus propiedades farmacológicas, se reporta la antiproliferativa, antimicótica, antioxidante, antimicrobiana, desinflamatoria y antihiper glucémica (Arciniega-Carreón *et al.*, 2020). Estudios

preclínicos realizados en ratones y ratas diabéticas inducidas con alloxan han permitido definir y constatar su actividad hipoglucemiante (Alarcón-Aguilar *et al.*, 2002). Los ensayos efectuados con los extractos acuosos y de diclorometano redujeron la concentración de colesterol, triglicéridos y azúcar en sangre. Asimismo, se ha reportado que *I. sonorae* puede ayudar en la prevención del desarrollo de trastornos metabólicos relacionados con una dieta alta en grasas (Rivera-Ramírez *et al.*, 2011).

Por otro lado, se analizó el extracto acuoso de *I. sonorae*, en el cual se determinó el contenido de glucósidos, e identificaron dos cucurbitanos presentes en el extracto: (22S)-3 α -(β -D-Glucopiranosiloxi)-16 α ,20,22,25-tetrahidroxi-(10 α)-cucurbita-5,23t-dien-11-ona (9) y 16 α ,20,25-trihidroxi-3 α -(2-O- α -L-ramnopiranosil- β -D-glucopiranosiloxi)-(10 α)-cucurbit-5-eno-11,22-diona (10) (figura 2). El extracto de *I. sonorae* tuvo una acción hipoglucémica semejante a las sulfonilureas, y además inactivó o interrumpió la actividad en los canales K_{ATP} (Banderas-Dorantes *et al.*, 2012). Adicionalmente, se reportó su inducción en células adiposas para la absorción y procesamiento de glucosa (Zapata-Bustos *et al.*, 2014).

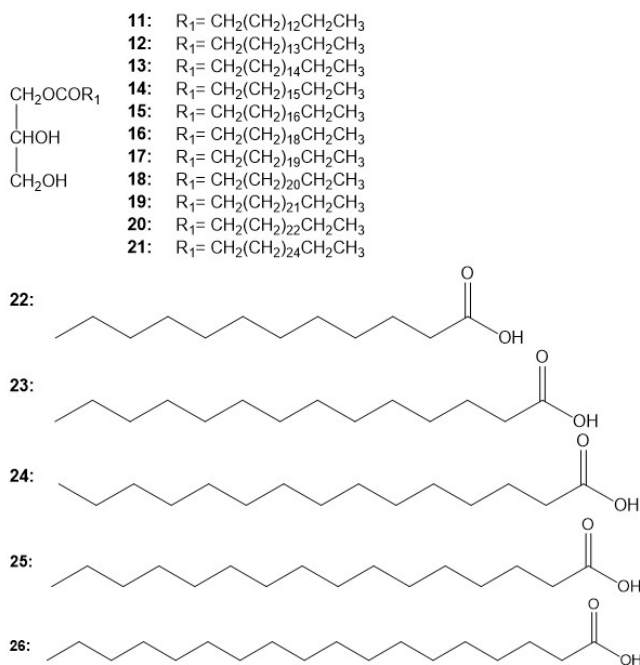
FIGURA 2



Cucurbitanos aislados de *Ibervillea sonorae*.
Fuente: Banderas-Dorantes *et al.* (2012).

En 2007, analizaron la capacidad antihiper glucémica del extracto de diclorometano de *I. sonorae*; también estudiaron algunas de sus subfracciones y una mezcla de monoglicéridos 1-monopalmitina (11), 1-monomargarato de glicerilo (12), 1-monoestearina (13), 1-monononadecilato de glicerilo (14), 1-monoaraquidato de glicerilo (15), 1-monobehenato de glicerilo (16), 1-monotricosanoato de glicerilo (17), 1-monotetracosanoato de glicerilo (18), 1-monopentacosanoato de glicerilo (19), 1-mono-hexacosanoato de glicerilo (20) y 1-monooctacosanoato de glicerilo (21) y diferentes ácidos grasos: ácido láurico (22), ácido mirístico (23), ácido pentadecanoico (24), ácido palmítico (25) y ácido esteárico (26) (figura 3), los cuales fueron elucidados y presentaron actividad para el control de la diabetes (Hernández-Galicia *et al.*, 2007). Adicionalmente, se ha reportado su capacidad para disminuir el nivel glucémico y de triglicéridos (Contreras *et al.*, 2005).

FIGURA 3



Compuestos aislados de *Ibervillea sonorae* con actividad antidiabética.

Fuente: Hernández-Galicia *et al.* (2007).

Esta cucurbitácea, típica y endémica de México, se continúa estudiando, y se han identificado constituyentes como alcaloides, taninos, saponinas, flavonoides, fenoles y cucurbitacinas.

MEDICAGO SATIVA LINN

Medicago sativa Linn., mejor conocida como alfalfa, es planta herbácea perenne que pertenece a la familia de la *Leguminosae*; su género *Medicago* es de los más extensos en la naturaleza, integrado por 83 especies. Su origen se ubica en Asia, aunque se puede encontrar en todo el mundo. Su ciclo de vida es de tres a doce años, el cual depende de las condiciones ambientales; su capacidad de adaptación le ha permitido crecer en zonas boscosas e incluso desérticas (Bora y Sharma, 2011).

Esta leguminosa perenne, de raíz pivotante, corona, tallos múltiples y hojas trifolioladas, presenta una compleja y muy diversa composición de compuestos constituyentes, entre los que se encuentran alcaloides, aminoácidos, carotenos, cumarinas, flavonoides, aminoácidos no proteicos, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, fitoestrógenos, fitoesteroides, poliaminas, proteínas, saponinas, esteroides, compuestos volátiles (terpenos y alcoholes), minerales y vitaminas (Al-Suod *et al.*, 2018).

Esta especie se ha utilizado con múltiples propósitos, como forraje, remediación de suelos y para el tratamiento de diversos malestares y padecimientos. Sus propiedades medicinales han hecho que haya sido usada en problemas neuronales, estomacales, musculares, inflamatorios, renales, infecciosos, etc., en diferentes países, como China, India, Irak, Turquía, Estados Unidos y México. Lo anterior abrió el interés de los investigadores para descubrir e identificar cualidades rejuvenecedoras, antipiréticas, antiulcerosas, antiprostáticas, antihistamínicas, antioxidantes, antiinflamatorias, antifúngicas, antiasmáticas, antimicrobianas, diuréticas, anticancerígenas, galactagogo en trastornos del sistema nervioso central, hipocolesterolémicas, antiaterosclerosis y antidiabéticas (Bora y Sharma, 2011).

Su actividad antidiabética se ha evaluado en estudios preclínicos, donde se ha administrado en la dieta (6.25%) y como extracto (1 mg/400 ml); los resultados mostraron un efecto benéfico antihiperlipémico

(Bora y Sharma, 2011). Por otro lado, se ha reportado que el extracto acuoso (1 mg/ml) induce el transporte, oxidación e incorporación de la glucosa al glucógeno en el músculo; también incrementó la secreción de insulina. Además, se ha publicado que puede ayudar a contrarrestar la resistencia a la insulina, lo cual favorece su reconocimiento (Gray y Flatt, 1997).

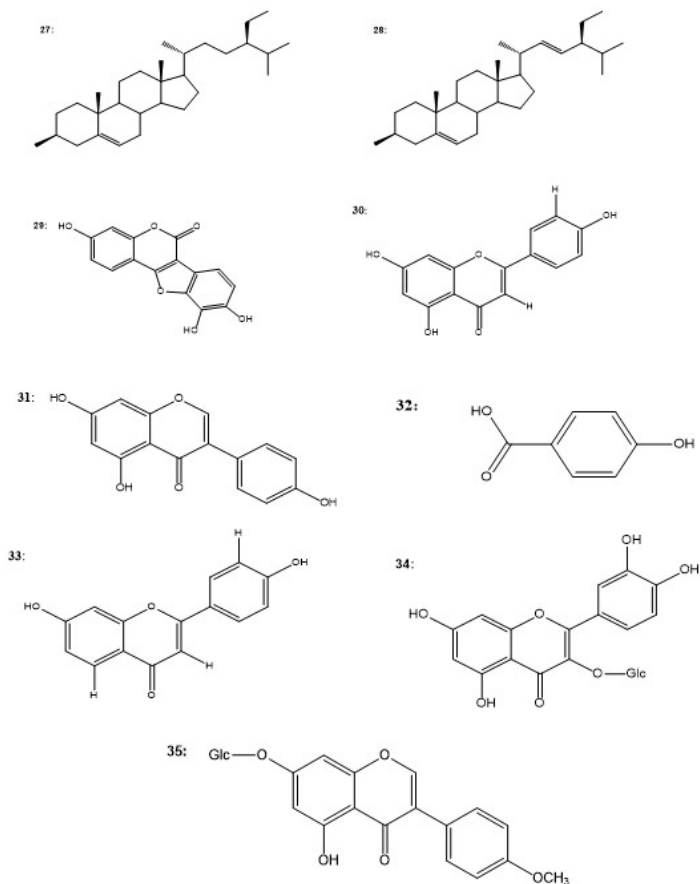
La administración de *M. sativa L.* en ensayos con ratones diabéticos permitió identificar la acción protectora sobre células β de los islotes pancreáticos, lo que se relacionó con la efectividad y acción de la insulina para mitigar y regular el incremento de la concentración de la glucosa en sangre. Los autores de dicho estudio sugieren que la actividad antidiabética está asociada al manganeso presente en la planta, ya que este elemento podría generar un efecto hipoglucemiante (Swanston-Flatt *et al.*, 1990).

Habrà que mencionar también que el extracto alcohólico de *M. sativa L.* fue evaluado para determinar su capacidad ante la presencia de especies reactivas oxidantes y radicales libres, los cuales se encuentran estrechamente vinculados a enfermedades metabólicas como la diabetes mellitus. La investigación mostró que el extracto tiene la propiedad de captar, neutralizar y quelar las diferentes especies reactivas oxidantes. Los investigadores proponen que los efectos benéficos se deben a los polifenoles y flavonoides presentes en el extracto (Rana *et al.*, 2010).

Asimismo, el extracto de metanol presentó cualidades antihiperlipidémicas y antihiperlipidémicas, por lo cual fue fraccionado. La fracción de éter de petróleo del extracto fue consistente con la reducción lipídica; además, se identificaron dos compuestos (β -sitosterol (27) y estigmasterol (28) (figura 4). Por otro lado, la fracción acetato de etilo del extracto siguió presentando la acción hipoglucemiante y se elucidaron los siguientes bioactivos: 10-hidroxi-cumestrol (29), apigenina (30), genisteína (31), ácido p-hidroxi-benzoico (32), 7,4'-dihidroxi-flavona (33), quercetina-3-glucósido (34) y sissotrina (35) (figura 4) (Seida *et al.*, 2015).

En un estudio realizado en 2015, observaron que al dosificar el fitoestrógeno genisteína (4,7,4'-trihidroxiisoflavona (31)) de *M. sativa*. (2.6 y 20 mg / kg), éste contribuía a disminuir los niveles glucémicos en diabetes tipo 1 y 2 en ratones diabéticos (Guo *et al.*, 2015).

FIGURA 4



Compuestos aislados de *Medicago sativa* Linn.

Fuente: Seida *et al.* (2015).

PARKINSONIA ACULEATA

Parkinsonia aculeata L. (*Caesalpinaceae*) es un árbol espinoso de tamaño mediano (4-6 m) que se encuentra en regiones semiáridas, se conoce comúnmente como espino de Jerusalén o palo verde, su origen se ubica en el continente americano, pertenece a la familia *Leguminosae* (Bathia *et al.*, 1966). La planta es cultivada para la producción de flores amarillas

exóticas y aromáticas, las semillas se consumen, y se le emplea de forma ornamental. Se conoce que cuenta con una serie de metabolitos secundarios, como son taninos, flavonoides, flavonas, flavona C-glucósidos, furfural, carbohidratos, aminoácidos libres, ácidos grasos y esteroides (Ali *et al.*, 2005). Esta especie ha sido usada en la medicina tradicional para controlar el exceso de azúcar en sangre. Además, se le atribuyen propiedades farmacológicas, entre las que destacan antipalúdicas, antimicrobianas, antihiper glucémicas y antihiperlipidémicas, su uso se ha realizado de forma empírica (Leite *et al.*, 2011).

De forma típica, *Parkinsonia aculeata* es consumida a partir de una infusión realizada con la parte aérea de la planta, la cual se ingiere durante el transcurso del día como complemento para control de trastornos y afecciones inducidas por la diabetes, en países como Nigeria, India, Brasil o México. En 2007, se realizaron una serie de ensayos en un modelo diabético *in vivo* (ratas) para constatar si el extracto acuoso de *P. aculeata* presentaba cualidades antidiabéticas. Los parámetros bioquímicos (peso corporal, ingesta de alimentos y líquidos, volumen urinario, glucógeno hepático, glucosa sérica, colesterol total, colesterol HDL, triglicéridos, glucosa y urea urinaria, y el peso del tejido adiposo epididimario, hígado, riñones y músculos esqueléticos) analizados reflejan niveles y concentraciones semejantes al grupo control sano, lo que apuntó a una acción benéfica en el tratamiento terapéutico de la DM, y también comprobó su uso en la medicina tradicional. Además, abrió la posibilidad para explorar en el aislamiento y elucidación del bioactivo responsable de este efecto farmacológico (Leite *et al.*, 2007).

Entre las publicaciones reportadas, destaca la realizada en 2011; se documentó el potencial del extracto hidroalcohólico de *P. aculeata* para mitigar a la DM. Los parámetros analizados en los modelos *in vivo* (ratas) presentaron una disminución significativa en la concentración de glucosa en sangre y en orina, y en urea y triglicéridos. Al mismo tiempo, se observó una recuperación de hígado, riñones, musculo esquelético y lípidos. Los resultados mencionados sugieren el posible uso de *P. aculeata* como tratamiento alternativo para la patología diabética (Leite *et al.*, 2011).

En los últimos años se ha evaluado la interacción que tienen las enfermedades metabólicas, como la obesidad, en la diabetes; un gran número de personas con sobrepeso u obesidad padecen DM, lo que ha

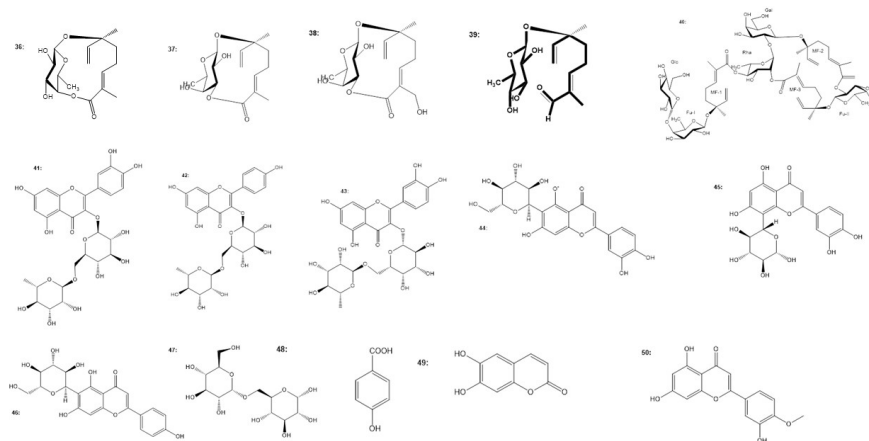
generado que muchos investigadores se involucren en explorar esta relación. En 2016, investigaron las consecuencias de administrar el extracto hidroetanólico y la subfracción de acetato de etilo a ratones obesos; los autores identificaron una disminución a la resistencia a la insulina después de la dosificación de los extractos. La glucosa sérica, insulina, leptina, y los resultados del modelo de homeostasis para la resistencia a la insulina (*HOMA-IR*) se vieron favorecidos por los extractos de *P. aculeata*; los efectos benéficos se deben a los cambios inducidos en la ruta metabólica y en los sitios de acción. Los autores sugieren que los fitoconstituyentes de *P. aculeata* presentes en la subfracción hidroetanólica y de acetato de etilo pueden ayudar en contra de las afectaciones relacionadas con el sobrepeso y la DM (Araujo *et al.*, 2016).

En una investigación, trabajaron con el extracto hidroetanólico de *P. aculeata*; en evaluaron parámetros bioquímicos de ratones obesos. Los experimentos dieron como resultado una disminución de la resistencia a la insulina, volviendo eficiente la actividad de ésta, y en consecuencia se observaron niveles glucémico reducidos. Lo anterior fue resultado de potenciar la acción antioxidante y antiinflamatoria para lograr mitigar las afecciones diabéticas (Araujo *et al.*, 2016).

Debido al interés que ha generado la planta, un grupo de científicos estudiaron el extracto metanólico acuoso (80:20) de *P. aculeata* (AME). El AME fue sometido a un estudio fitofarmacológico para identificar propiedades y los fitoconstituyentes responsables de dichas actividades. El estudio reveló cualidades analgésicas, antipiréticas, desinflamatorias, hepatoprotectoras, hipoglucémicas, anticolesterolémicas y antioxidantes. Adicionalmente, encontraron flavonoides, glucosídicos y monoterpenos glucosídicos macrocíclicos basados en desoxi-hexosídicos. Los investigadores mencionaron que estos metabolitos secundarios juegan un papel fundamental en la acción benéfica de la *P. aculeata*. Las biomoléculas elucidadas fueron (6S)-ácido-mentafólico-6-*O*- β -D-fucopiranosido (parkineno A) (36), ácido-(6S)-6-*O*- β -D-fucopiranosil-(E)-2,6-dimetil-6-hidroxi-2,7-octadienoico (parkineno B) (37), ácido (6S)-6-*O*- β -D-fucopiranosil-(E)-6-hidroxi-2-hidro-ximetil-6-metil-2,7-octadienoico (parkineno C) (38), (6S)-6-*O*- β -D-quinovopiranosil-(E)-2,6-dimetil-6-hidroxi-2,7-octadienal (parkineno D) (39), parkineno E (40), rutina (41), kaempferol 3-*O*- β -D-rutinosido (42), quercetina-3-*O*- α -L-ramnopiranosil-(1'' \rightarrow 6')- β -D-galactopiranosido (43),

isoorientina (44), orientina (45), isovitexina (46), 6-*C*- β -D-glucopiranosilsantol (47), ácido *p*-hidroxibenzoico (48), esculetin (49) y diosmetina (50) (figura 5) (Marzouk *et al.*, 2013).

FIGURA 5



Compuestos aislados de *Parkinsonia aculeata*.

Fuente: Marzouk *et al.* (2013).

PSACALIUM DECOMPOSITUM

Psacalium decompositum es una planta de la familia de las *Asteraceae*, tribu *Senecioneae*; es una especie de planta herbácea; se conoce comúnmente como matarique (Contreras-Weber *et al.*, 2002). Puede medir hasta un metro de altura, presenta tallos semileñosos cubiertos de pelos. En su etapa de floración, brinda pequeñas conformaciones de flores blancas. Su origen se ubica en México y crece en zonas semiáridas. Algunos grupos étnicos la utilizan para aliviar dolencias, neuralgias, úlceras, etc. Entre las actividades que se le han identificado, se pueden mencionar antidiabética, antineurálgica, antipodágrica, antirreumática, astringente, catártica; para cafalalgias, congestiones hepáticas; antidiarréica y vagotonista. Usualmente es empleada en la medicina etnobotánica para el tratamiento de la diabetes mellitus tipo 2 y otros padecimientos; se consume principalmente en Estados Unidos y México. El proceso para

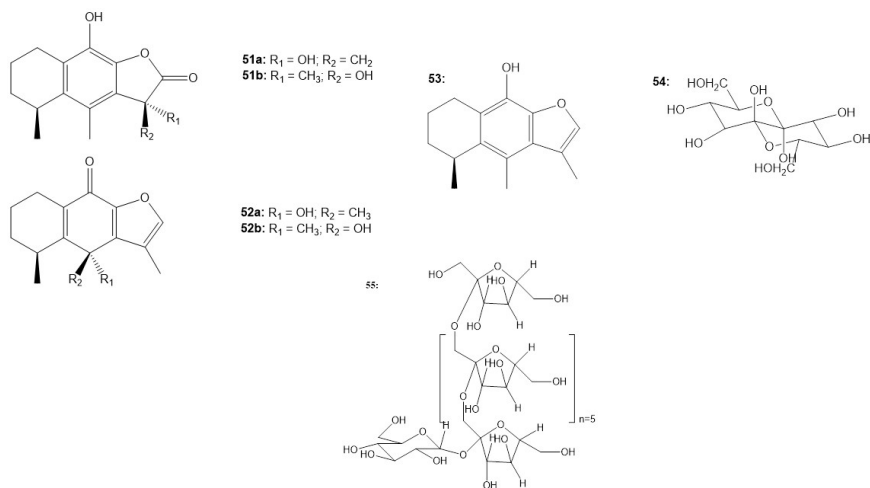
la obtención del remedio herbolario es por decocción de la raíz de la planta (Alarcón-Aguilar *et al.*, 2000).

Como producto del uso de la planta para tratamiento alternativo, algunos científicos han investigado la posible actividad antidiabética de *P. decompositum*. En 1999, estudiaron el extracto acuoso de la raíz, en busca de bioactivos responsables de la acción hipoglucemiante; los autores aislaron y elucidaron cinco biomoléculas. Dos nuevos eremofilanólidos, 3-hidroxicalólido (51a) y *epi*-3-hidroxicalólido (51b); también los conocidos furanoeremofilanos, cacalona (52a) y epicacalona (52b) (figura 6); y por último, un fructooligasacarido (55), el cual se aisló de la subfracción de cloruro de metanol. Los ensayos realizados en modelo *in vivo* mostraron que los bioactivos 51a, 51b, y 53 (figura 6) presentan acción antihiper glucémica. Estos compuestos se encuentran presentes tanto en los extractos acuosos como los etanólicos. Por lo anterior, se considera que su acción antihiper glucémica se debe a presencia de los compuestos biológicos. Es importante mencionar que, debido a la presencia de alcaloides de pirrolizidina en los extractos (acuoso y etanólico), no se recomienda su empleo, ya que se ha documentado afectaciones hepáticas (Inman *et al.*, 1999).

Por otro parte, un grupo de investigadores trabajaron con el extracto acuoso de *P. decompositum* obtenido por decocción y liofilización. A continuación, realizaron el fraccionamiento y observaron que la fracción 1 conformada por polisacáridos del extracto, dio positivo a reducir los niveles glucémicos (Alarcón-Aguilar *et al.*, 2000a; 2000b). Posteriormente, en una publicación reportaron que la subfracción de metanol obtenida de un extracto acuoso ayudó a disminuir la concentración de azúcar en sangre en ratones diabéticos con un grado moderado y alto (Contreras-Weber *et al.*, 2002).

En un artículo científico publicado en 2005, mencionan el aislamiento de un bioactivo nuevo: la petalosa (54) (figura 6). Es una ulopiranos obtenida del extracto acuoso de *P. decompositum*. Los autores indican que tuvo actividad a una concentración de 100 mg/kg. La nueva biomolécula se identifica como 2,6-anhidro-5-ulopiranos (Contreras *et al.*, 2005).

FIGURA 6



Compuestos aislados de *Psacalium decompositum*.

Fuente: Contreras *et al.* (2005).

Adicionalmente, el grupo de investigadores que han explorado en la actividad hipoglucemiante del extracto acuoso de *P. decompositum* también identificaron el bioactivo antihiperlipémico 54 (figura 6). Presentaron un documento donde exponen los beneficios antioxidantes y antiinflamatorios del extracto hidrológico. Sus resultados permiten definir que los parámetros bioquímicos analizados en órganos (hígado, riñones, corazón) tuvieron una reducción en su concentración. Además, parámetros bioquímicos como lipoperoxidación, hemoglobina glucosilada, y el índice glucémico, se vieron mitigados. Los autores refieren que los fructanos hipoglucemiantes presentes en el extracto intervienen en el reconocimiento y eficiencia de la insulina; también previenen el desarrollo de las complicaciones diabéticas asociadas a los procesos inflamatorios propios de la enfermedad (Alarcón-Aguilar *et al.*, 2010).

El bioactivo responsable de la actividad antihiperlipémica es un fructooligosacárido (55) (figura 6) (Jiménez-Estrada *et al.*, 2011). Los ensayos realizados para determinar su potencial antidiabético permitieron identificar que induce efectos favorables en el control de triglicéridos, colesterol, lipoperoxidación e inflamación, entre otras patologías que se presentan durante la diabetes (Merino-Aguilar *et al.*, 2014).

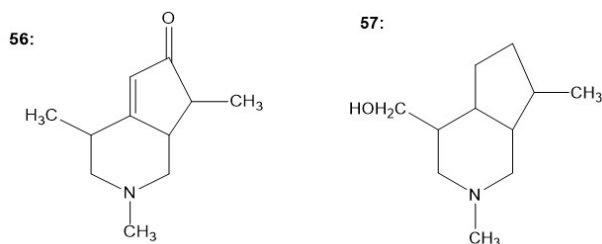
TECOMA STANS LINN

Tecoma stans Linn es una planta que pertenece a la familia de la *Bignoneaceae*; es conocida vulgarmente como saúco amarillo, corneta amarilla, flor amarilla, tronadora, huiztontli o huiztonxochitl. Es un arbusto que se distribuye ampliamente en México; en la medicina tradicional, se le atribuyen propiedades diuréticas, vermífugas, estomacales, antisifilíticas, narcóticas, anestésicas, antiinflamatorias y antinociceptivas e hipoglicemiantes (Costantino *et al.*, 2003a; Paz Naranjo *et al.*, 2003). Se le utiliza con frecuencia para el tratamiento de la sintomatología de la DM. En la etnobotánica, se recomienda hacer una infusión con ramas y flores de la especie botánica en medio litro de agua. Los fitoconstituyentes identificados son taninos, flavonoides, quinonas, saponinas, alcaloides monoterpénicos (tecomanina, tecostanina y lapachol), azúcares (glucosa, fructosa, sacarosa y xilosa), triterpenoides (ursólico y ácidos oleanólicos y a-amirina), *p*-sitosterol, compuestos fenólicos (ácidos clorogénico, cafeico, vainílico, *o*-cumarico y sinápico) y glucósidos (iridoides) (Lozoya-Meckes y Mellado-Campos, 1985).

Las hojas de *T. stans* tienen una larga trayectoria como remedio para el tratamiento de la diabetes en México, razón por la cual un grupo de investigadores se dieron a la tarea de investigar si los alcaloides aislados e identificados son los responsables de controlar los niveles elevados de glucosa en sangre. Los bioactivos elucidados son tecomina (56) y tecostanina (57) (figura 7); ambos mostraron ser eficaces, seguros e hipoglucemiantes. Los autores sugieren que siguen el mecanismo de las sulfonilureas (Hammouda y Amer, 1966). Dichos alcaloides han presentado una estabilidad reducida (Hammouda y Khalafallah, 1971) y ayudan en la disminución del colesterol plasmático (Costantino Raimondi *et al.*, 2003b).

Por otro lado, el estudio publicado en 2009 menciona los beneficios de la administración del extracto acuoso de *T. stans*. Dichas acciones se relacionan con la inhibición de las enzimas glucosidasa intestinal y lipasa, los efectos hipoglucémicos a nivel posprandiales, la acción hipocolesterolemica e hipotriglicéridos (Aguilar-Santamaría *et al.*, 2009). También en la sensibilidad y resistencia de la insulina en adipocitos celulares (Alonso-Castro *et al.*, 2010). Además, sugieren su intervención en la regeneración del páncreas (Dhaked *et al.*, 2011).

FIGURA 7



Compuestos aislados de *Tecoma stans* Linn con actividad hipoglucemiante.

Fuente: Hammouda y Amer (1966).

Como se mencionó antes, la presencia y desarrollo de las especies reactivas oxidantes son inductores del estrés oxidativo, lo que se encuentra estrechamente relacionado con este tipo de enfermedades crónicas, como la DM; dicho eso, distintos estudios se han centrado en reunir información acerca de cómo tratar o eliminar este tipo de compuestos reactivos. En el caso de *T. stans*, en 2015 observaron que es capaz de disminuir, eliminar e inhibir la presencia de las especies reactivas oxidantes; asimismo, comprobaron que puede reprimir a la enzima α -glucosidasa (Margret *et al.*, 2015).

En estudios más recientes, se han efectuado estudios con *T. stans* para identificar las rutas o dianas en las cuales está actuando. En el trabajo publicado en 2016, estudiaron el extracto hidroalcohólico de *T. stans*. Mediante un biofraccionamiento dirigido, realizaron la identificación de una elevada concentración de flavonoides y flavonas (luteolina y crisoeriol), los cuales inhibieron la actividad de las enzimas digestivas y de la lipasa pancreática asociada con la activación y el reconocimiento de la insulina (Ramírez *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES Y TENDENCIAS FUTURAS

A lo largo del capítulo se mostró el gran potencial que tienen las plantas medicinales para el tratamiento de la DM; podría pensarse que el uso de éstas ha ido disminuyendo con el paso del tiempo. Sin embargo, en nuestros días más del 80% de las personas usan la medicina tradicional

para tratar algún tipo de padecimiento. Tomando en cuenta que México cuenta con 306 especies para tratar la diabetes mellitus y que muchas de éstas aún carecen de estudios científicos, nos encontramos ante una gran oportunidad de estudio, en donde se puedan encontrar nuevas alternativas terapéuticas para tratar la DM, haciendo uso de la gran diversidad de especies con que se cuenta.

REFERENCIAS

- AGUILAR-SANTAMARÍA, L., Ramírez, G., Nicasio, P., Alegría-Reyes, C., y Herrera-Arellano, A. (2009). “Antidiabetic activities of *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth”, *Journal of Ethnopharmacology*, 124(2), 284-288.
- AHMED, M. U., Ibrahim, A., Dahiru, N. J., y Mohammed, H. S. (2020). “Alpha amylase inhibitory potential and mode of inhibition of oils from *Allium sativum* (Garlic) and *Allium cepa* (onion)”, *Clinical Medicine Insights: Endocrinology and Diabetes*, 13, 1-5.
- AL-SUOD, H., Ratiu, I. A., Ligor, M., Ligor, T., y Buszewski, B. (2018). “Determination of sugars and cyclitols isolated from various morphological parts of *Medicago sativa* L”, *Journal of Separation Science*, 41(5), 1118-1128.
- ALARCÓN-AGUILAR, F. J., Campos-Sepúlveda, A. E., Xolalpa-Molina, S., Hernández-Galicia, E., y Román-Ramos, R. (2002). “Hypoglycaemic activity of *Ibervillea sonorae* roots in healthy and diabetic mice and rats”, *Pharmaceutical Biology*, 40(8), 570-575.
- ALARCÓN-AGUILAR, F. J., Fortis-Barrera, A., Ángeles-Mejía, S., Banderas-Dorantes, T. R., Jasso-Villagómez, E. I., Almanza-Pérez, J. C., y Román-Ramos, R. (2010). “Anti-inflammatory and antioxidant effects of a hypoglycemic fructan fraction from *Psacalium peltatum* (H.B.K.) Cass. in streptozotocin-induced diabetes mice”, *Journal of Ethnopharmacology*, 132(2), 400-407.
- ALARCÓN-AGUILAR, F. J., Jiménez-Estrada, M., Reyes-Chilpa, R., González-Paredes, B., Contreras-Weber, C. C., y Román-Ramos, R. (2000a). “Hypoglycemic activity of root water decoction, sesquiterpenoids, and one polysaccharide fraction from *Psacalium*

- decompositum* in mice”, *Journal of Ethnopharmacology*, 69(3), 207-215.
- ALARCÓN-AGUILAR, F. J., Jiménez-Estrada, M., Reyes-Chilpa, R., y Román-Ramos, R. (2000b). “Hypoglycemic effect of extracts and fractions from *Psacalium decompositum* in healthy and alloxan-diabetic mice”, *Journal of Ethnopharmacology*, 72(1-2), 21-27.
- ALI, M. S., Ahmed, F., Kashif, M., Azhar, I., e Ibrahim, S. A. (2005). “Parkintin: a new flavanone with epoxy- isopentyl moiety from *Parkinsonia aculeata* linn. (Caesalpinaceae)”, *Natural Product Research*, 19(1), 53-56.
- ALONSO-CASTRO, A. J., Zapata-Bustos, R., Romo-Yáñez, J., Camarillo-Ledesma, P., Gómez-Sánchez, M., y Salazar-Olivo, L. A. (2010). “The antidiabetic plants *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth (*Bigoniaceae*) and *Teucrium cubense* Jacq (*Lamiaceae*) induce the incorporation of glucose in insulin-sensitive and insulin-resistant murine and human adipocytes”, *Journal of Ethnopharmacology*, 127, 1-6.
- ARAUJO, T. G., Oliveira, A. G., Vecina, J. F., Marin, R. M., Franco, E. S., Abdalla Saad, M. J., y de Sousa Maia, M. B. (2016). “Treatment with *Parkinsonia aculeata* combats insulin resistance-induced oxidative stress through the increase in PPAR γ /CuZn-SOD axis expression in diet-induced obesity mice”, *Molecular and Cellular Biochemistry*, 419(1-2), 93-101.
- ARAUJO, T. G., Oliveira, A. G., Vecina, J. F., Marin, R. M., Franco, E. S., Abdalla Saad, M. J., y de Sousa Maia, M. B. (2016). “*Parkinsonia aculeata* (Caesalpinaceae) improves high-fat diet-induced insulin resistance in mice through the enhancement of insulin signaling and mitochondrial biogenesis”, *Journal of Ethnopharmacology*, 183, 95-102.
- ARCINIEGA-CARREÓN, I. Y., Ramírez-Sotelo, M. G., Ramos-Valdivia, A. C., Salas, C. E., Ortega, A., y Oliver-Salvador, C. (2020). “Metabolites in cultured cells of *Ibervillea sonora* (S. Watson) Greene display increased hypoglycemic activity compared to that seen in plant roots”, *Horticulture Environment and Biotechnology*, (0123456789).

- ARGAÉZ-LOPEZ, N., Wachter, N.H., Kumate-Rodriguez, J., Cruz, M., Talavera, J., Rivera-Arce, E., Lozoya, X. (2003). "The Use of Complementary and Alternative Medicine Therapies in Type 2 Diabetic Patients in Mexico". *Diabetes Care*, 8, 2470-2471.
- BANDERAS-DORANTES, T. R., Román-Ramos, R., Zamilpa, A., García-Macedo, R., Díaz, M., Campos, M. G., y Alarcón-Aguilar, F. J. (2012). "Influence of two hypoglycemic *Cucurbitaceae* (*Cucurbita ficifolia* Bouché and *Ibervillea sonorae* Greene) on ATP-sensitive potassium channels in rat aortic rings", *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 11(6), 510-519.
- BANG, M.-A., Kim, H.-A., y Cho, Y.-J. (2009). "Alterations in the blood glucose, serum lipids and renal oxidative stress in diabetic rats by supplementation of onion (*Allium cepa*. Linn)", *Nutrition Research and Practice*, 3(3), 242.
- BATHIA, V. K., Gupta, V. R., y Seshadri, T. R. (1966). "C-Glycosides of the leaves of *Parkinsonia aculeata*", *Tetrahedron*, 33(1879), 1147-1152.
- BORA, K. S., y Sharma, A. (2011). "Phytochemical and pharmacological potential of *Medicago sativa*: a review", *Pharmaceutical Biology*, 49, 211-220.
- CONTRERAS-WEBER, C., Pérez-Gutiérrez, S., Alarcón-Aguilar, F., y Román-Ramos, R. (2002). "Anti-hyperglycemic effect of *Psacalium peltatum*", *Proceedings of the Western Pharmacology Society*, 45 (marzo), 134-136.
- CONTRERAS, C., Román, R., Pérez, C., Alarcón, F., Zavala, M., y Pérez, S. (2005). "Hypoglycemic activity of a new carbohydrate isolated from the roots of *Psacalium peltatum*", *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 53(11), 1408-1410.
- COSTANTINO, L., Lins, A. P., Barlocco, D., Celotti, F., El-Abady, S. A., Brunetti, T., y Antolini, L. (2003a). "Characterization and pharmacological actions of tecostanine, an alkaloid of *Tecoma stans*", *Pharmazie*, 58(2), 140-142.
- COSTANTINO, L., Raimondi, L., Pirisino, R., Brunetti, T., Pessotto, P., Giannessi, F., y El-Abady, S. A. (2003b). "Isolation and pharmacological activities of the *Tecoma stans* alkaloids", *Farmaco*, 58(9), 781-785.

- CRUZ, E. C., y Andrade-Cetto, A. (2015). “Ethnopharmacological field study of the plants used to treat type 2 diabetes among the Cakchiquels in Guatemala”, *Journal of Ethnopharmacology*, 159, 238-244.
- DHAKED, U., Gupta, V., Singh, D. P., y Nama, G. (2011). “Antidiabetic activity of *Tecoma stans* flower”, *Pharmacologyonline*, 1, 553–558.
- EL-DEMERDASH, F. M., Yousef, M. I., y El-Naga, N. I. A. (2005). “Biochemical study on the hypoglycemic effects of onion and garlic in alloxan-induced diabetic rats”, *Food and Chemical Toxicology*, 43(1), 57-63.
- ELDIN, I. M. T., Ahmed, E. M., y Abd, E. H. M. (2010). “Preliminary study of the clinical hypoglycemic effects of *Allium cepa* (red onion) in type 1 and type 2 diabetic patients”, *Environmental Health Insights*, 4, 71-77.
- Federation International Diabetes. (2019). “Atlas de la diabetes de la FID”, 9a edición. *International Diabetes Federation*. 1-180.
- GÓMEZ, D., Salvador, P., Sanz, J., y Casanova, J. L. (2021). “Regional estimation of garlic yield using crop, satellite and climate data in Mexico”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 181, 105943.
- GRAY, A. M., y Flatt, P. R. (1997). “Pancreatic and extra-pancreatic effects of the traditional anti-diabetic plant, *Medicago sativa* (lucerne)”, *British Journal of Nutrition*, 78, 325-334.
- GUO, T. L., Germolec, D. R., Zheng, J. F., Kooistra, L., Auttachoat, W., Smith, M. J., y Elmore, S. A. (2015). “Genistein protects female nonobese diabetic mice from developing type 1 diabetes when fed a soy- and alfalfa-free diet”, *Toxicologic Pathology*, 43(3), 435-448.
- HAMMOUDA, Y., y Amer, M. S. (1966). “Antidiabetic effect of tecomine and tecostanine”, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 55(12), 1452-1454.
- HAMMOUDA, Y., y Khalafallah, N. (1971). “Stability of tecomine, the major antidiabetic factor of *Tecoma Stans* (Juss.) f. *Bignoniaceae*”, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 60, 1142-1145.
- HERNÁNDEZ-GALICIA, E., Calzada, F., Román-Ramos, R., y Alarcón-Aguilar, F. J. (2007). “Monoglycerides and fatty acids from *Ibervillea sonorae* root: isolation and hypoglycemic activity”, *Planta Médica*, 73(3), 236-240.

- INMAN, W. D., Luo, J., Jolad, S. D., King, S. R., y Cooper, R. (1999). "Antihyperglycemic sesquiterpenes from *Psacalium decompositum*", *Journal of Natural Products*, 62(8), 1088-1092.
- Instituto Nacional de Salud Publica (2016). "Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de Medio Camino2016(ENSANUT 2016)". *Secretaria de Salud*. 1-149.
- JIMÉNEZ-ESTRADA, M., Merino-Aguilar, H., López-Fernández, A., Rojano-Vilchis, N. A., Román-Ramos, R., y Alarcón-Aguilar, F. J. (2011). "Chemical characterization and evaluation of the hypoglycemic effect of fructooligosaccharides from *Psacalium decompositum*", *Journal of Complementary and Integrative Medicine*, 8(1), 1-10.
- KOTHARI, D., Lee, W.-D., Niu, K.-M., y Kim, S.-K. (2019). "The genus *Allium* as poultry feed additive: a review", *Animals*, 9(1032), 1-21.
- KUMARI, K. (2002). "Antidiabetic and antioxidant effects of S -methyl cysteine sulfoxide isolated from onions", *Indian Journal of Experimental Biology*, 40(septiembre), 5-9.
- LEITE, A. C. R., Araujo, T. G., Carvalho, B. D. M., Maia, M. B. S., y Lima, V. L. de M. (2011). "Characterization of the antidiabetic role of *Parkinsonia aculeata* (Caesalpineaceae)", *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2011, 692378.
- LEITE, A. C. R., Araujo, T. G., Carvalho, B. M., Silva, N. H., Lima, V. L. M., y Maia, M. B. S. (2007). "*Parkinsonia aculeata* aqueous extract fraction: biochemical studies in alloxan-induced diabetic rats", *Journal of Ethnopharmacology*, 111(3), 547-552.
- LONDHE, V. P., Gavasane A. T., Nipate S. S., Bandawane D. D., y Chaudhari P. D. (2011). "Role of garlic (*allium sativum*) in various diseases: an overview", *Journal of Pharmaceutical Research And Opinion*, 1(4), 129-134.
- LOZOYA-MECKES, M., y Mellado-Campos, V. (1985). "Is the *Tecoma stans* infusion an antidiabetic remedy?", *Journal of Ethnopharmacology*, 14(1), 1-9.
- MARGRET EVANGELINE, R., Murugan, N., Praveen Kumar, P., y Nimal Christhudas, I. V. S. (2015). "In vitro studies on A-glucosidase inhibition, antioxidant and free radical scavenging properties of

- Tecoma stans* L”, *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 7, 44-49.
- MARZOUK, M. S., Moharram, F. A., El Dib, R. A., y El-Hossary, D. G. (2013). “Novel macrocyclic monoterpene glycosides from bioactive extract of *Parkinsonia aculeata* L.”, *Cell Biochemistry and Biophysics*, 65(3), 301-313.
- MELINO, S., Leo, S., y Papajani, V. T. (2019). “Natural hydrogen sulfide donors from *Allium* sp. as prevention and therapy”, *Nutrients*, 11(1581), 1-25.
- MERINO-AGUILAR, H., Arrieta-Báez, D., Jiménez-Estrada, M., Magos-Guerrero, G., Hernández-Bautista, R. J., Susunaga-Notario, A. del C., y Alarcón-Aguilar, F. J. (2014). “Effect of fructooligosaccharides fraction from *Psacalium decompositum* on inflammation and dyslipidemia in rats with fructose-induced obesity”, *Nutrients*, 6(2), 591-604.
- PAZ NARANJO, J. de la, Corral Salvadó, A., Rivero Jiménez, G., Fernández Menéndez, M., y Pérez Santoya, P. (2003). “Efecto hipoglucemiante del extracto fluido de *Tecoma stans* Linn en roedores”, *Rev. Cuba. Med. Mil*, 32(1), 13-17.
- RAMÍREZ, G., Zamilpa, A., Zavala, M., Pérez, J., Morales, D., y Tortoriello, J. (2016). “Chrysoeriol and other polyphenols from *Tecoma stans* with lipase inhibitory activity”, *Journal of Ethnopharmacology*, 185, 1-8.
- RANA, M., Katbamna, R. V., Padhya, A. A., Dudhrejiya, A., Navin, N. P., y Sheth, N. R. (2010). “In vitro antioxidant and free radical scavenging studies of alcoholic extract of *Medicago sativa* L in vitro antioxidant and free radical scavenging studies of alcoholic extract of *Medicago sativa* L”, *Rom. j. biol. plant biol.*, 55(1), 15-22.
- RIVERA-RAMÍREZ, F., Escalona-Cardoso, G. N., Garduño-Siciliano, L., Galaviz-Hernández, C., y Paniagua-Castro, N. (2011). “Antiobesity and hypoglycaemic effects of aqueous extract of *Ibervillea sonorae* in mice fed a high-fat diet with fructose”, *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2011, 1-6.
- RIVLIN, R. S. (2001). Recent advances on the nutritional effects associated with the use of garlic as a supplement. *Historical perspective on the use of garlic*, 1, 2, 951-954.

- SAEDDI, P., Petersohn, I., Salpea, P., Malanda, B., Karuranga, S., Unwin, N., Colagiuri, S., Guariguata, L., Motala, A. A., Ogurtsova, K., Shaw, J. E., Bright, D., Williams, R., On behalf of the IDF Diabetes Atlas Committee. (2019). "Global and regional diabetes prevalence estimates for 2019 and projections for 2030 and 2045: Results from the International Diabetes Federation Diabetes Atlas, 9th edition". *Diabetes Research and Clinical Practice*, 157, 1-10.
- SEIDA, A., El-Hefnawy, H., Abou-Hussein, D., Mokhtar, F. A., y Abdel-Naim, A. (2015). "Evaluation of *Medicago sativa* L. sprouts as antihyperlipidemic and antihyperglycemic agent", *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 28(6), 2061-2074.
- SHANG, A., Cao, S. Y., Xu, X. Y., Gan, R. Y., Tang, G. Y., Corke, H., y Li, H. (2019). "Bioactive compounds and biological functions of garlic (*Allium sativum* L.)", *Foods*, 8(7), 1-31.
- SWANSTON-FLATT, S. K., Day, C., Bailey, C. J., y Flatt, P. R. (1990). "Traditional plant treatments for diabetes. Studies in normal and streptozotocin diabetic mice", *Diabetologia*, 33(8), 462-464.
- World Health Organization. (2019). "Diabetes". <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes/08/02/2023>.
- ZAPATA-BUSTOS, R., Alonso-Castro, Á. J., Gómez-Sánchez, M., y Salazar-Olivo, L. A. (2014). "Ibervillea sonora (Cucurbitaceae) induces the glucose uptake in human adipocytes by activating a PI3K-independent pathway", *Journal of Ethnopharmacology*, 152(3), 546-552.

CAPÍTULO 23
PROPIEDADES FARMACOLÓGICAS DE
COMPUESTOS BIOACTIVOS OBTENIDOS
DE SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES DE DÁTIL

MARÍA DE LOS ÁNGELES DE LA ROSA-ALCARAZ¹

GASTÓN RAMÓN TORRESCANO-URRUTIA²

REY DAVID VARGAS-SÁNCHEZ³

BRISA DEL MAR TORRES-MARTÍNEZ⁴

ARMIDA SÁNCHEZ-ESCALANTE⁵

RESUMEN

La palma datilera (*Phoenix dactylifera* L.) es un cultivo tradicional de las zonas áridas y semiáridas del Oriente Medio y África del Norte y emergente en el norte de México y sur de los EE. UU. Durante la producción primaria de dátil, se generan cantidades importantes de subproductos del fruto debido a que no alcanzan la madurez comercial o los estándares de calidad que exige el mercado. Otro subproducto importante es la semilla, la cual representa hasta 10% de los residuos que producen las industrias procesadoras de dátil. En fechas recientes ha crecido el interés en aprovechar los subproductos de este fruto, ya que aún contienen nutrientes importantes, tales como carbohidratos, lípidos, proteínas, fibra dietaria, vitaminas y minerales, así como fitoquímicos (por ejemplo, fenoles, antocianinas, carotenoides, tocoferoles,

¹ Universidad Estatal de Sonora (UES), blvd. Manlio Fabio Beltrones 810, col. Bugambilias, CP 85875, Navojoa, Sonora.

² Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Animal (CTAOA), Laboratorio de Investigación en Carne y Productos Cárnicos (LICPC). Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas 46, CP 83304, Hermosillo, Sonora.

³ *Id.*

⁴ *Id.*

⁵ *Id.* Autora de correspondencia: armida-sanchez@ciad.mx.

tocotrienoles, fitoesteroles). Estudios *in vivo* e *in vitro*, donde se han evaluado extractos de dátil y su semilla, ricos en estos fitoquímicos, han mostrado resultados alentadores debido a las propiedades nutracéuticas y farmacológicas con potenciales beneficios para la salud. En el presente capítulo se detalla el estado del arte, retos y perspectivas futuras del uso potencial de subproductos de dátil en la industria farmacológica.

PALABRAS CLAVE: dátil, manejo de residuos, pérdida de alimentos, semilla de dátil, subproducto, sustentabilidad.

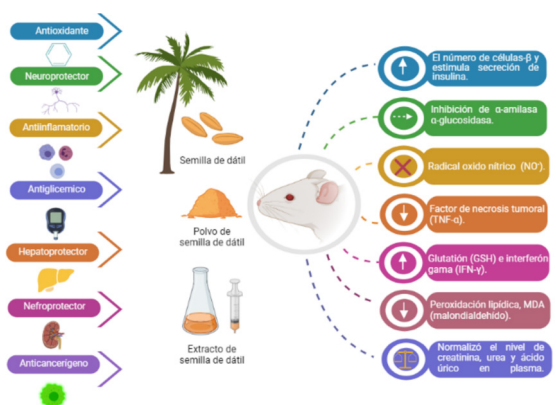
INTRODUCCIÓN

La palma datilera (*Phoenix dactylifera* L.) se ha cultivado durante más de cinco mil años. En la actualidad, es el cultivo más importante en regiones áridas y semiáridas en el mundo; los principales países productores son Egipto, Irán, Arabia Saudita, Argelia, Irak, Pakistán, Sudán, Omán, Emiratos Árabes Unidos y Túnez (FAO, 2020). En el caso particular de México, el cultivo de dátil en 2018 registró una producción de 8 945.69 ton, que representaron un valor aproximado de 450 millones de pesos. Si bien la producción de dátil crece año con año, este cultivo es emergente en México y no existe una cultura arraigada del consumo del fruto. La importancia del dátil radica en su composición de nutrientes y calorías que aporta. Los dátiles han proporcionado seguridad alimentaria, nutricional y beneficios para la salud de las poblaciones que viven en el desierto y otras zonas áridas (<https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1253131/>). Los estudios de evaluación de su composición química proximal han revelado que contiene 44-88% de azúcar, 0.1-1.4% de grasa, minerales como potasio (2.5% veces más que el plátano), además de calcio, magnesio y hierro, proteína (1.1-2.6%), fibra dietética total (3.57-10.9%), así como vitaminas, aminoácidos y compuestos fitoquímicos (Al-Shahib y Marshall, 2003; Al-Farsi y Lee, 2008). Por lo anterior, su cultivo representa un alto potencial tanto para el fruto como para sus subproductos, en particular la semilla de dátil, que constituye aproximadamente el 15% del fruto (Besbes *et al.*, 2009), y la torta de prensado de dátil, que está compuesta por semilla molida, cáscara del fruto y pulpa, la cual es el principal subproducto de la obtención de jugo de dátil y representa del 17-28% (Majzoobi *et al.*, 2020).

En lo que respecta a la semilla de dátil, antes no presentaba interés alguno debido a que no son comestibles, por lo que su uso se limitaba a la alimentación animal, principalmente por la carencia de métodos de extracción y el desconocimiento del valor y significado de los subproductos del fruto en general (Sirisena *et al.*, 2018). Actualmente, a partir de este subproducto, se han logrado recuperar ingredientes, como la fibra dietaria; además, la extracción, identificación y caracterización de moléculas bioactivas, como antioxidantes, ambos de gran interés en el área de la salud (Echegaray *et al.*, 2020). Por otro lado, diversas investigaciones

han evidenciado el potencial farmacológico de extractos de semilla de dátil en el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas y cáncer (Sekeroglu *et al.*, 2012; Habib e Ibrahim, 2011) (figura 1). Por ello, es imperante explorar el potencial uso de los compuestos de la semilla de dátil, así como comparar sus propiedades químicas y farmacológicas dependiendo de la región productora.

FIGURA 1



Propiedades farmacológicas de la semilla de dátil,
principal subproducto de la industria datilera.

Fuente: Elaboración propia.

Referente a la torta de prensado de dátil, Al-Farsi *et al.* (2007) realizaron un estudio de este material (eliminando la semilla), y los resultados mostraron que tiene un promedio de 4.39% de proteína, 1.72% de grasa, 1.95% de cenizas, 82.36% de carbohidratos (28.57% de fibra dietaria) y altas cantidades de antioxidantes. Gómez y Martínez (2018) determinaron la composición química y valor nutricional de algunas tortas de prensado de frutos, y revelaron que éstas son una fuente rica de nutrientes y compuestos bioactivos. Recientemente, Majzoobi *et al.* (2020) investigaron los beneficios nutricionales y saludables de la torta de prensado de dátil, y la describieron como material disponible y económico que puede ser utilizado en productos alimenticios con valor agregado, y que puede dejar atrás su uso limitado a la alimentación animal o descartado en el drenaje o a cielo abierto, lo que causa grandes pérdidas

económicas y daño ambiental debido a su naturaleza y alto contenido de humedad. Sin embargo, en la actualidad no existen estudios referentes al potencial farmacológico de moléculas bioactivas de este material, por lo que se abre una ventana de posibilidades para su investigación.

Por lo anterior, el objetivo de este capítulo es dar a conocer el potencial farmacológico de las moléculas bioactivas presentes en subproductos de la industria datilera y determinar el impacto de su uso en la cadena de valor del fruto, que en consecuencia contribuye a la reducción del desaprovechamiento de alimentos e impacto ambiental, actividades que van de la mano como resultado de la pérdida de alimentos en la cadena agroalimentaria, donde la industria datilera no es la excepción.

VALORACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS DE DÁTIL: UNA VISIÓN GLOBAL

En la actualidad, la producción, utilización e industrialización mundial de dátil está en continuo crecimiento; en 2018 se produjeron 8.52 millones de toneladas del fruto (FAO, 2020). Lo anterior, debido a que ha ganado gran importancia en la nutrición humana por su contenido de nutrientes esenciales; y como resultado, toneladas de subproductos de la palma datilera son descartados diariamente durante las etapas pre y postcosecha, en la que se incluyen recolección, clasificación, almacenamiento y acondicionamiento, a causa de inconformidades en los estándares de calidad, daños físicos, tamaño pequeño o apariencia no atractiva del fruto (Besbes *et al.*, 2009; Chandrasekaran y Bahkali, 2013; Trigueros *et al.*, 2014).

La falta de uso de dátiles de calidad inferior representa un problema ambiental, sumado a una pérdida importante de materia prima que aún contiene compuestos bioactivos que pueden ser extraídos y utilizados como ingredientes valiosos para la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria. Tal es el caso de pigmentos, fibra dietaria, ácidos orgánicos, azúcares, así como compuestos antibacterianos y antifúngicos (Chandrasekaran y Bahkali, 2013; Sánchez Zapata *et al.*, 2011).

Las características de los subproductos del fruto pueden variar de acuerdo con múltiples factores, como tipo de cultivo, estado de madurez

del dátil o el proceso utilizado durante su industrialización. Los principales estados de madurez son conocidos por su nombre árabe: *hababouk* (inmaduro y completamente cubierto por el cáliz), *kimri* (verde, no maduro), *khalal* (gran tamaño; su astringencia decrece y puede ser comestible en algunas variedades), *rutab* (maduro, suave y comestible) y *tamar* (maduro, de reducida humedad, comestible) (Baliga *et al.*, 2011). Por tradición, en países árabes utilizan sus subproductos (dátil tamar, duro) para preparar productos como jugo de dátil, productos fermentados y pasta de dátil (Chandrasekaran y Bahkali, 2013). Sin embargo, el subproducto fresco es más delicado y tiene una vida útil corta (2-5 días), y requiere de un proceso industrial adicional para su aprovechamiento; por ello, la mayoría se utiliza para alimentación animal y como sustrato para la obtención de productos mediante fermentación (Vilella-Esplá, 2004).

En cuanto a la semilla de dátil, se le considera como el principal subproducto de la industria datilera, ya que se produce en grandes cantidades durante operaciones como el deshuesado, macerado y cocción al vapor; después de la manufactura de productos derivados del dátil, como pasta, jarabe, aderezo, miel, mermelada, vinagreta y fruto relleno con nueces comestibles (Ashraf y Hamidi, 2011). Esta semilla se considera un material altamente valioso, principalmente por los productos que se pueden obtener a partir de ella, como aceite (Habib *et al.*, 2013), polvo de semilla (Juhaimi *et al.*, 2012), café herbal (Habib e Ibrahim, 2009), compuestos fitoquímicos libres y ligados a fibra, que contienen 60-90% de fenoles y que impactan a la salud del colon (Sirisena *et al.*, 2016). Por ello, se ha sugerido que la utilización de estos subproductos puede ser una opción rentable que beneficie a la industria datilera; asimismo, puede ser muy importante para la agricultura, al incrementar los ingresos (Sirisena *et al.*, 2015).

MOLÉCULAS BIOACTIVAS PRESENTES EN LOS SUBPRODUCTOS

Dátil

En la actualidad, el interés por los compuestos bioactivos en los alimentos ha aumentado de forma considerable. El papel de las frutas en

la prevención de las enfermedades ha sido atribuido, en gran medida, a las propiedades antioxidantes de sus componentes fitoquímicos, entre los que se incluyen flavonoides, fenilpropanoides y ácidos fenólicos, los cuales pueden captar radicales libres involucrados en la patogénesis de enfermedades, incluyendo cáncer, diabetes tipo 2, hipertensión arterial y enfermedades neurodegenerativas (Miller y Rice-Evans, 1997). De acuerdo con Ayala Zavala *et al.* (2011), los subproductos de los frutos que corresponden pueden contener cantidades incluso superiores a la del mismo fruto, los cuales regularmente son descartados aun cuando contienen grandes cantidades de compuestos bioactivos que promueven actividades en beneficio para la salud.

Un estudio realizado por Martín-Sánchez *et al.* (2014) muestra que los subproductos de dátil son una excepcional fuente de moléculas bioactivas que incluyen fenoles hasta 1.4 g equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g, flavonoides en altas cantidades (874 mg equivalentes de rutina (ER)/100 g), carotenoides (β -caroteno, luteína y neoxantina) y antocianinas, con potencial como ingrediente de bajo costo y funcional, que puede dar valor a los frutos descartados.

Semilla

La semilla es un importante subproducto de la industria datilera, la cual se produce en grandes cantidades. Los carbohidratos representan la mayor proporción e incluyen fibra, hemicelulosa, lignina, celulosa y cenizas. El contenido de glucosa y fructosa en la semilla es de 10.8% y 7.3%, respectivamente. Los polisacáridos –como glucomananos y galactomananos– también están presentes; estos últimos son importantes para la industria alimentaria y farmacéutica. Al menos se han identificado diecisiete aminoácidos, incluyendo los esenciales, como lisina, isoleucina, leucina, metionina, treonina, valina y fenilalanina (Baliga *et al.*, 2011).

La composición de ácidos grasos es el factor más importante que determina el uso comestible de los aceites y se liga a sus características físicas y químicas. Por tanto, los aceites comestibles son descritos en términos de la abundancia de los ácidos grasos que contienen. En la semilla de dátil, los ácidos grasos más abundantes son el oleico (36.6-50.1%), linoleico

(8.9-19.2%), láurico (10.2-20.4%), palmítico (9.8-10.2%) y esteárico (7.5-10.7%), además de otros en menor proporción, como son los ácidos heptadecanoico, araquidónico, docosanoico, palmitoleico, linolénico; y los principales tocoles, que incluyen α -, β - y γ -tocotrienol. Sin embargo, a pesar de ser comestible, su producción es económicamente inviable ya que no es comparable a otras semillas oleaginosas (Nehdi *et al.*, 2018). Respecto al contenido de minerales se presenta de manera secuencial $K^+ > Mg^{2+} > Na^+ > Ca^{2+} > Fe^{2+} > Mn^{2+} > Zn^{2+} > Co^{2+} > Cr^{3+}$; sin embargo, el contenido de macronutrientes y micronutrientes depende de la variedad de semilla (Ali-Mohamed y Khamis, 2004; Habib y Ibrahim, 2009).

Los polifenoles son metabolitos secundarios de las plantas y forman un componente integral de la dieta humana; su bioactividad se relaciona con su contribución a la defensa antioxidante del cuerpo y la modulación de las actividades bioquímicas contra el estrés oxidativo, y por ello son ampliamente apreciados (Forman *et al.*, 2014). En la semilla del dátil, los compuestos fenólicos se encuentran en una concentración importante (2 697-5 342 mg EAG/100 g y 1224-1844 mg ER/100 g), superando aproximadamente 27 veces más la concentración en el fruto (Al-Farsi y Lee, 2008).

En diversas investigaciones, se ha evaluado el contenido fenólico y actividad antioxidante de extractos de la semilla de dátil, y se ha logrado identificar una gran diversidad ácidos fenólicos: *p*-cumárico, cafeico, ferúlico, clorogénico, gálico, protocatecuico, siríngico, vinílico; flavonoides como hesperidina, kaempferol, naringenina, rutina, quercetina; así como compuestos orgánicos como el pirogalol y catecol (Hilary *et al.*, 2020; Hmidani *et al.*, 2020). La concentración de estas moléculas varía debido a la diferencia en variedad, condiciones de crecimiento, etapa de madurez, temporada, origen geográfico, tipo de suelo, condiciones de almacenamiento, así como el método de extracción utilizado en los estudios (Bouhlali *et al.*, 2017).

Propiedades farmacológicas

Desde la antigüedad, algunas plantas se han utilizado en la medicina popular debido a su origen natural y sus reconocidos beneficios para

la salud. Los frutos, hojas, semillas y polen de *P. dactylifera*, tradicionalmente, han sido utilizados para el tratamiento de diferentes enfermedades y trastornos de la salud, ya que son una fuente importante de compuestos bioactivos, que son los principales responsables de su actividad biológica. La preocupación de los consumidores por su salud ha promovido el uso de productos naturales, comúnmente utilizados como alimento y en la medicina tradicional (Echegaray *et al.*, 2020).

Propiedad neuroprotectora

En relación con el síndrome de Alzheimer, se ha postulado que la mayoría de los cambios cognitivos y conductuales observados en ésta se deben a deficiencias en las vías colinérgicas del cerebro. En estudios con fitoquímicos presentes en algunas plantas medicinales, se ha encontrado que muchos de estos compuestos presentan actividad farmacológica frente a la enzima colinesterasa, como una estrategia promisoriosa frente a esta enfermedad (Shah *et al.*, 2017). En este sentido, un estudio realizado por Sekeroglu *et al.* (2012) evaluó *in vitro* extractos etanólicos de café y semillas de dátil frente a las enzimas acetilcolinesterasa y butirilcolinesterinasa, relacionadas con neurodegeneración. Los resultados mostraron que el extracto de semilla a 300 µg/ml fue el que presentó los mejores resultados de inhibición (52.96% y 83.22%, respectivamente).

Propiedad hipoglucemiante

La diabetes es un trastorno metabólico crónico desencadenado por alteraciones en los carbohidratos, proteínas y metabolismo de lípidos, donde se observa una secreción reducida o sensibilidad de la insulina junto con control deficiente de glucosa. En diversos estudios se ha mostrado que la diabetes se asocia con estrés oxidativo, y se ha encontrado deficiencia de antioxidantes en etapas de prediabetes o diabetes. La hiperglicemia no controlada puede producir abundantes radicales libres de varias formas, algunas de las cuales son glucólisis, activación de vías intercelulares de sorbitol, autooxidación de glucosa, activación de nicotinamida adenina

dinucleótido, que depende de la proteína cinasa C. Con lo anterior, se propicia la oxidación de las células β -pancreáticas, lo que conduce a la interrupción de la producción de insulina (Chikezie *et al.*, 2015). En algunas investigaciones se ha revisado el papel que juegan los polifenoles en el control de la glucosa en sangre de pacientes diabéticos; de esta manera, se ha descrito el mecanismo de polifenoles y compuestos fenólicos, que incluye inhibición de la absorción de glucosa, protección del daño de células β -pancreáticas y mejora de la liberación y sensibilidad de insulina, disminución de la inflamación, modulación de la vía metabólica de carbohidratos y regulación de las vías de señalización dependientes e independientes. Derivado de lo anterior, los compuestos polifenólicos han ganado interés científico debido a su efecto potencial en la regulación de la diabetes y sus complicaciones (Patel *et al.*, 2012; Solayman *et al.*, 2016; Thomford *et al.*, 2018).

En el dátil y sus subproductos, principalmente la semilla, se ha propuesto que la presencia de una gran variedad de compuestos bioactivos—que incluyen fenoles, flavonoides, procianidinas y saponinas— ejerce actividad antidiabetogénica, principalmente por la captación de radicales libres mediante la vía de la actividad antioxidante, lo cual incrementa el nivel de los antioxidantes endógenos, como superóxido dismutasa, catalasa y glutatión peroxidasa, y por la inhibición de enzimas α -amilasa y α -glucosidasa (Eddine *et al.*, 2014; Mia *et al.*, 2020; Saryono, 2019; Sirisena *et al.*, 2016).

Los extractos de *P. dactylifera* administrados a ratas con diabetes mellitus tipo 2 inducidas con estreptozotocina presentaron un efecto en la reducción significativa de la concentración de glucosa e incremento de la concentración de insulina. Estos resultados se atribuyeron a la presencia de flavonoides, los cuales pueden incrementar el número de células β -pancreáticas y estimulan la secreción de insulina, mecanismo de acción bien descrito por Alam *et al.* (2016). También, El Foughli *et al.* (2013) evaluaron la eficacia de un extracto de semilla de dátil en el control de diabetes mellitus tipo I en ratas. El estudio consistió en cuantificar el péptido-C producido por el páncreas a la par que la insulina, donde el grupo de estudio suministrado con 10 ml de extracto + insulina mostró una reducción estadísticamente significativa en el nivel de glucosa en sangre, comparado con el grupo tratado sólo con insulina

y el control. Khan *et al.* (2016), en un estudio *in vitro*, evaluaron y compararon la actividad antidiabetogénica de extractos de semilla de dátil (acuoso, etanólico, metanólico y cetónico) de cinco cultivares de dátiles de Omán. La inhibición de las enzimas α -glucosidasa y α -amilasa fue dependiente del solvente de extracción; el extracto acuoso presentó una significativa actividad antidiabetogénica *in vitro* en comparación con el fármaco estándar, la acarbosa. La inhibición de enzimas es una estrategia en el control de la hiperglicemia posprandial, que reduce la velocidad de hidrólisis de almidón, disacáridos y carbohidratos de cadena larga a glucosa, ya que la absorción de glucosa en el intestino decrece debido a la actividad de estas enzimas. Resultados similares se encontraron en extractos de semilla de cuatro variedades de dátiles cultivados en Túnez (Masmoudi-Allouche *et al.*, 2016).

En otro estudio realizado por Sirisena *et al.* (2016) evaluaron la inhibición de α -amilasa y α -glucosidasa de extractos de semilla de dátil de cinco variedades. En el ensayo se evaluó la actividad de los fenoles libres y ligados. Ambas fracciones mostraron inhibición frente a α -glucosidasa de intestino de ratas con poca o ninguna inhibición frente a α -amilasa pancreática. Los polifenoles ligados mostraron una fuerte inhibición frente a α -glucosidasa comparada con los polifenoles libres. Los agentes antihiperlipémicos, como la acarbosa, son ampliamente usados en combinación con medicamentos para tratar diabetes mellitus Tipo 2, ya que inhiben enzimas digestivas de almidón, como α -amilasa y α -glucosidasa (Tundis *et al.*, 2010). Sin embargo, es bien conocido que ejercen efectos no placenteros (flatulencias, hinchazón, distensión abdominal) debido a la supresión de la digestión de almidón en el intestino delgado y la fermentación bacteriana en el colon (Yee y Fong, 1996).

Por ello, se sugiere el uso de la fracción de fenoles ligados como un ingrediente funcional con propiedades antihiperlipémicas.

Propiedad antiinflamatoria

La inflamación es un mecanismo de respuesta del sistema inmune frente a varios factores, como infecciones, quemaduras, productos químicos tóxicos, alérgenos y otros estímulos. Los factores de transcripción LOX

y el complejo proteico NF- κ B (factor nuclear Kappa B) juegan un papel importante en la inflamación, cáncer, diabetes y otras enfermedades. La regulación de los factores de transcripción es un paso crítico en la prevención de enfermedades. Desafortunadamente, los fármacos antiinflamatorios muestran efectos colaterales severos que incluyen hemorragia intestinal, úlcera péptica, falla renal y hepática, osteoporosis, cataratas y erupciones en la piel, además de su alto costo. Por ello, se promueve el desarrollo de nuevos medicamentos que no presenten dichos efectos, por lo que se han llevado a cabo estudios que demuestran que los extractos acuosos de productos naturales incluyen sustancias químicas como fenoles, alcaloides, glucósidos y carbohidratos que presentan potencial antiinflamatorio (Sharma *et al.*, 2011; Talhouk *et al.*, 2007).

Al respecto, varios estudios con la semilla de dátil han demostrado que este subproducto posee propiedades antiinflamatorias. Bouhlali *et al.* (2020) estudiaron el efecto antiinflamatorio de extractos obtenidos con metanol-agua de cuatro variedades de semilla de dátil *in vitro* e *in vivo*. Los resultados mostraron que los extractos fueron efectivos en la eliminación de radicales libres de óxido nítrico (IC_{50} = 84-163 μ g/ml), en la estabilización de la membrana de eritrocitos (IC_{50} = 116-304 μ g/ml) y evitando la desnaturalización de proteínas (IC_{50} = 90-225 μ g/ml). Asimismo, la administración oral de extractos de semilla inhibió de forma significativa la formación de edemas durante todas las fases de inflamación en las patas y orejas de ratas inducida por carragenano y aceite de ricino, lo cual sugiere que los compuestos de la semilla de dátil inhiben diferentes facetas y mediadores químicos de inflamación. Otros estudios han evidenciado la inhibición de histamina, prostaglandinas y leucotrienos, enzimas ciclooxigenasas COX-1 y COX-2 y citocinas proinflamatorias como el factor de necrosis tumoral (TNF- α) e IL-6, por la presencia de compuestos tales como luteolina, quercetina, ácido clorogénico, ácido cafeico y ácido gálico (Jayaprakasam *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006; Kimata *et al.*, 2000; Kimura *et al.*, 1985). Por tanto, la potente actividad antiinflamatoria es debida al efecto sinérgico de dichos compuestos, los cuales están presentes en la semilla de dátil.

En otro estudio, realizado por Saryono *et al.* (2019), se observó efecto antiinflamatorio de semilla de dátil en polvo suministrada en diferentes dosis (1, 3 y 5 g/kg) en ratas con inflamación inducida por cloruro

carbónico (CCl_4). Después de catorce días de tratamiento, la dosis de 5 g/kg de semilla de dátil en polvo disminuyó la citosina proinflamatoria $\text{TNF-}\alpha$, que es un fuerte marcador de inflamación, mientras glutatión (GSH) e interferón gama ($\text{IFN-}\gamma$) se incrementaron significativamente. Los resultados han sido asociados a presencia de los polifenoles y polisacáridos en la semilla de dátil, que estimulan $\text{IFN-}\gamma$ y la expresión de ARNm, y mejoran la respuesta inmune de linfocitos Th1. Por lo anterior, se sugiere que la suplementación con semilla de dátil puede ayudar a la inmunidad del cuerpo mediante la regulación de los mediadores proinflamatorios.

Propiedad nefroprotectora

La enfermedad renal tiene un efecto importante en la salud global, como causa directa de morbilidad y mortalidad global. En particular, la nefropatía por inmunoglobulina A (IgA) es una de las enfermedades renales más frecuente que causa daño renal a los diminutos filtros dentro de los riñones. La IgA es una proteína que ayuda a combatir las infecciones. En las personas con nefropatía por IgA, estas proteínas se acumulan y forman grumos dentro de los diminutos filtros de los riñones (glomérulos). Estos grumos de proteínas dañan los glomérulos y el daño puede causar enfermedad renal crónica y puede conducir a fallo renal (<https://www.kidneyfund.org>). Además, se ha descrito que el estrés oxidativo derivado de una producción excesiva de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno es un factor importante que contribuye al desarrollo de daño renal. Numerosos estudios *in vitro* e *in vivo* han sugerido que los flavonoides presentes en té, café y granos de cereales, y otros productos naturales, exhiben propiedades antioxidantes y un efecto protector contra el daño renal inducido por estrés oxidativo derivado de hiperglicemia (Baradaran *et al.*, 2015; Wei *et al.*, 2018).

Por otra parte, en la medicina tradicional está bien documentado que el consumo regular del fruto de dátil tiene efectos benéficos en nefropatía (Museo de Fármacos Naturales, en la sección de Farmacognosia del Servicio Botánico Nacional de la India) (Selvam, 2008; Baliga *et al.*, 2011). Asimismo, en estudios *in vivo* han encontrado que, al suministrarse durante dos meses extractos acuosos de dátil (4 ml/kg) a ratas

inducidas a nefrotoxicidad con ácido dicloroacético, se normalizó significativamente el incremento del nivel de creatinina, urea y ácido úrico en plasma, además de que se redujeron los niveles elevados de malondialdehído; también se normalizó la actividad de las enzimas antioxidantes, como superóxido dismutasa, catalasa y glutatión peroxidasa, y antioxidantes no enzimáticos, incluyendo el glutatión. Además, en tejido renal, los análisis histológicos evidenciaron la restauración del riñón dañado en ratas tratadas con ácido dicloroacético inductor de nefrotoxicidad. Los resultados se asociaron a los compuestos antioxidantes mayoritarios, tales como ácidos ferúlico, cafeico y *p*-cumárico (El Arem *et al.*, 2014). Por tanto, se podría coadyuvar en la nefrotoxicidad causada por fármacos como cisplatino utilizado como agente quimioterapéutico, y cuya toxicidad es ampliamente documentada (Hanigan y Devarajan, 2003).

Salah *et al.*, (2012) evaluaron la inhibición de estrés oxidativo y nefrotoxicidad inducida por dimetoato en ratas, con la utilización de extractos de dátil, comparando el efecto con vitamina C. Posterior a los dos meses de tratamiento, la administración de dimetoato indujo falla renal caracterizada por un incremento de los niveles de creatinina (+30.49%) y urea (+32.12%) en sangre, y la disminución de ácido úrico en sangre (-35.90%). Adicionalmente, dichas modificaciones se acompañaron de un marcado incremento de peroxidación lipídica en el riñón, las alteraciones bioquímicas se acompañaron de cambios histológicos como degeneración tubular, descamación de células tubulares y dilatación tubular. El tratamiento con el extracto de dátil y con vitamina C revirtieron los marcadores renales séricos, redujeron la peroxidación lipídica y restablecieron las enzimas de defensa antioxidante en el riñón, además de mejorar los cambios histopatológicos.

Al-Qarawi *et al.* (2008) investigaron el efecto de un extracto de dátil y de su semilla en ratas con nefrotoxicidad inducida por gentamicina. La gentamicina es un medicamento comúnmente utilizado para el tratamiento de infecciones moderadas a severas, y es común que ocasione nefrotoxicidad, evidenciada por el incremento del nivel de creatinina en sangre. Lo anterior ha propiciado la búsqueda de fármacos alternativos que disminuyan el efecto nocivo de la gentamicina. Los extractos de pulpa y semilla de dátil fueron efectivos en la reducción del nivel de creatinina y urea en sangre, y disminuyeron el daño renal. Los componentes

antioxidantes como melatonina, vitamina E, ácido ascórbico fueron sugeridos como base de la nefroprotección.

Propiedad anticancerígena

La evidencia científica actual apoya la idea de que el cáncer es el resultado del daño oxidativo en la célula por sustancias cancerígenas, que provocan una alteración en la regulación del ciclo celular. La producción de especies reactivas de oxígeno en el cuerpo puede resultar en la inducción y el mantenimiento de células oncogénicas a través de la mutación del ADN, una característica que se encuentra de manera abrumadora en las células cancerosas en comparación con las células normales (Valko *et al.*, 2006). El estudio de los efectos terapéuticos de la palma datilera (*P. dactylifera*) en la prevención del daño celular han sido documentados por la mejora en la terapia de cáncer y reducción del daño causado por la quimioterapia convencional (Yasin *et al.*, 2015).

Por otra parte, Diab y Aboul (2012) compararon el efecto antige-notóxico *in vivo* de extractos acuosos de semilla de dátil sobre daño en el ADN inducido por N-Nitroso-N-Metilurea, potente carcinógeno, mutágeno y teratógeno. El extracto de la semilla de dátil se suministró oralmente a una dosis de 25 mg/25 g (peso del ratón), cinco días por semana durante cuatro semanas consecutivas. Los resultados mostraron que el tratamiento con el extracto de semilla restauró el daño al ADN inducido por N-Nitroso-N-Metilurea, el cual se relacionó con la baja alteración estructural de los cromosomas, disminución de micronúcleos presentes en células de la médula ósea, e inhibición de fragmentación de ADN hepático. A pesar de los resultados, los autores indican que es necesario realizar estudios más profundos para establecer el efecto terapéutico de la semilla de dátil, mediante parámetros morfométricos que permitan identificar y cuantificar la alteración estructural cromosómica, reduciendo la posibilidad del error humano en la cuantificación visual a través del microscopio óptico, que permita un mayor recuento celular más cercano al utilizado en el diagnóstico de leucemia u otros tipos de cáncer relacionados con la médula ósea.

Habib *et al.* (2014) investigaron el efecto de extractos de semilla de dátil en la reducción de la proliferación de células de cáncer pancreático (Mia-Pa-Ca-2), daño al ADN y liberación de ferritina. La ferritina es una proteína que almacena el hierro en las células, y en las hepatopatías crónicas se refleja en los resultados anormales en el estudio del metabolismo del hierro (niveles de hierro sérico > 180 µg/dl, ferritina sérica > 2 000 ng/ml e índice de saturación de la transferrina elevados) (Feldman *et al.*, 2017). El extracto de semilla inhibió la proliferación de las células de cáncer de páncreas de manera dosis-dependiente, alcanzando 90% de inhibición a una concentración de 0.1 mg/ml después de 48 h de exposición. Además, se redujo el daño al ADN y la liberación de hierro de la proteína ferritina, lo cual es promisorio, principalmente por la capacidad de captación de radicales libres y la actividad antioxidante que presentaron los extractos en los ensayos *in vitro*.

Propiedad hepatoprotectora

El hígado es uno de los órganos más importantes en el cuerpo y desempeña un papel fundamental en la regulación de diversos procesos (metabolismo, secreción, almacenamiento y detoxificación de sustancias endógenas y exógenas). Debido a dichas funciones, las enfermedades hepáticas representan un problema de salud pública en todo el mundo. La fibrosis hepática representa la vía final común de las enfermedades hepáticas crónicas y eventualmente conduce a cirrosis y sus complicaciones, incluyendo insuficiencia hepática y carcinoma hepatocelular (Lee y Friedman, 2011).

A pesar de los esfuerzos de la medicina moderna, en la actualidad no existen fármacos efectivos; por tanto, la estrategia más apropiada es la eliminación de los agentes nocivos subyacentes o el retraso en la progresión de la enfermedad. La evidencia científica sugiere que con el uso de plantas y frutos puede lograrse un efecto hepatoprotector (Madrigal-Santillán *et al.*, 2014). Al respecto, el dátil y sus subproductos han demostrado ser efectivos en dicha afección.

Abdelaziz y Ali (2014) estudiaron el efecto de una suspensión acuosa de semilla de dátil en daño hepático inducido químicamente en ratas, para lo cual se suministró una suspensión diaria de semilla tostada o

cruda (1.0 g/kg). Posterior al tratamiento, las sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS), producto de la oxidación de lípidos, el óxido nítrico y el daño hepático oxidativo en ADN se mitigaron. De forma notable, hubo efecto del tostado de la semilla, comparable a silimarina (potente antioxidante, neutralizador de radicales libres, que puede proteger las células hepáticas expuestas a toxinas y promover el crecimiento de nuevas células hepáticas). Además, se restauró la actividad de las enzimas antioxidantes hepáticas (superóxido dismutasa y glutatión S-transferasa), y los análisis histopatológicos revelaron atenuación de las lesiones del hígado (vacuolización y proliferación de fibroblastos).

Al-Rasheed *et al.* (2015) probaron el efecto protector del fruto de dátil sobre el daño oxidativo en hígado de ratas. En dicho estudio, los extractos de pulpa y semilla fueron suministrados a una dosis de 6 ml/kg (peso de la rata) y utilizando café (300 mg/kg) como agente protector de referencia, durante ocho semanas. Los resultados mostraron reducción del nivel de marcadores inflamatorios, incluyendo el factor de necrosis tumoral (TNF- α), interleucina-6 e interleucina-1 β , así como el factor de crecimiento transformante- β 1 y deposición de colágeno en hígado lesionado. De acuerdo con estos autores, la angiogénesis mejoró al disminuir la expresión del factor de crecimiento endotelial vascular y CD31; al combinar los extractos de dátil + café y semilla + café, se potenció el efecto antifibrótico. La eficacia hepatoprotectora se plantea que se lleva a cabo mediante mecanismos antioxidantes, la cual se debe a los múltiples compuestos polifenólicos del dátil y semilla, como ácidos fenólicos (*p*-cumárico, ferúlico, sinápico), flavonoides (antocianinas y procianidinas) y oligoelementos (selenio, cobre, zinc y manganeso), además de vitamina C.

Propiedad antiobesogénica y antiolesterolémica

La obesidad es causada por exceso de la ingesta de calorías, y puede ser reincidido por la inhibición de la actividad de lipasa pancreática y reducida por la inhibición o disminución de la absorción de lípidos. La actividad inhibitoria de extractos de dátil y semilla de dátil contra enzimas clave relacionadas con la diabetes y obesidad fue evaluada por primera vez por Masmoudi-Allouche *et al.* (2016), quienes evaluaron extractos de semilla

de dátil de diferentes variedades, como Degle Nour, Ruchdi, Ftimi y Kentichi. Sólo los extractos obtenidos de la semilla mostraron una alta actividad antilipasa, dependiente de la variedad, como sigue: Kentichi ($IC_{50} = 1.21 \mu\text{g/ml}$) > Deglet Nour ($IC_{50} = 12.11 \mu\text{g/ml}$) > Ruchdi ($IC_{50} = 18.10 \mu\text{g/ml}$) > Ftimi ($IC_{50} = 96.45 \mu\text{g/ml}$). Todos los extractos que presentaron actividad fueron menos potentes que Orlistat, un agente antilipasa bien conocido por inhibir lipasa pancreática ($IC_{50} = 0.92 \mu\text{g/ml}$). Aunque, de acuerdo con los resultados, se sugiere que la variedad Kentichi pudiera actuar como coadyuvante en la prevención o tratamiento de obesidad. Al respecto, se ha establecido que la actividad inhibitoria de lipasa ejercida por compuestos fenólicos derivados de plantas es producida por la acción de ácido gálico, catequina, epicatequina, ácido elágico, miricetina, quercetina, kaempferol, resveratrol y antocianinas (McDougall *et al.*, 2009).

La hiperlipidemia es un factor de riesgo de enfermedad cardiovascular asociada a obesidad. El efecto del polvo de semilla de dátil variedad Ajwa en el nivel de lípidos séricos fue evaluado mediante un ensayo clínico aleatorizado, controlado, doble ciego. Los pacientes hipercolesterolémicos participantes fueron instruidos a tomar polvo de semilla de dátil variedad Ajwa (200 mg/cápsula) tres veces al día durante noventa días. Posterior a ese periodo, se cuantificó una disminución de 19.4, 22.5 y 25.78% en los niveles de colesterol total, lipoproteínas de baja densidad (LDL) y triglicéridos, respectivamente, junto con un aumento en las lipoproteínas de alta densidad (HDL) de 23.81% en el grupo de intervención, porcentaje que fue significativamente mejor que en el grupo placebo (Jubayer *et al.*, 2020). Estos efectos se asocian a los fitoquímicos, en particular a las saponinas (componentes presentes en extractos de semilla de dátil), las cuales tienen capacidad de inhibir o retrasar la absorción de lípidos en el intestino, inhibiendo la actividad de la lipasa pancreática (Adeneye *et al.*, 2010).

Por otro lado, un estudio realizado por Khan *et al.* (2018), en el cual se investigó el efecto hipolipidémico y antioxidante de extractos de semilla de dátil variedad Ajwa en un modelo con ratas hiperlipidémicas, inducido a una dieta alta en grasa, dio como resultado que no se encontraron diferencias significativas comparando con el grupo control; no obstante, en el estudio se indican las limitaciones de la investigación y se proponen estrategias para profundizar acerca del potencial hipolipidémico de los extractos de la semilla.

PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA APLICACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE DÁTIL

Para llevar a cabo la aplicación de subproductos de dátil, es necesario el desarrollo de nuevas investigaciones centradas en conocer la bioactividad de subproductos alimentarios subutilizados, como es el caso del dátil. La mayoría de los estudios se realizan utilizando materiales de calidad comercial; por tal motivo, los resultados obtenidos de diversos estudios utilizando extractos de semilla de dátil resultarán muy promisorios, como se mencionó ampliamente en este documento. Sin embargo, un área de oportunidad sería la incorporación de semilla en forma de polvo o de extractos en diversas matrices alimentarias que sirvan como vehículo para la liberación de moléculas bioactivas. La riqueza, diversidad y particularidad de moléculas funcionales encontradas en los dátiles y sus subproductos podrían contribuir al desarrollo de nuevos fármacos. Sin embargo, la agroindustria necesita encontrar las técnicas apropiadas para dar valor a los subproductos. Al respecto, se puede incentivar la formación en aspectos científico-tecnológico a productores y directivos de este sector industrial, e impulsar a la innovación a partir de subproductos. Es importante destacar que, para que la sinergia entre la industria datilera y la comunidad científica tenga éxito, es necesario tener en cuenta la demanda del consumidor, aplicar conocimientos científicos mediante equipos multidisciplinarios, así como invertir en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i).

CONCLUSIONES

El aprovechamiento de subproductos de la industria datilera considerarse un catalizador para la innovación y el desarrollo de nuevos productos farmacológicos, alimenticios y biotecnológicos. La evidencia científica presentada en este documento pone de manifiesto el potencial uso de la semilla de dátil (principal subproducto valorable del dátil) para ser revalorado y obtener moléculas bioactivas, como polifenoles, flavonoides y otras que ejercen actividad antirradical, característica importante, considerando la estrecha relación de los radicales libres con las diversas

fisiopatologías de importancia para el sector salud, como las enfermedades no transmisibles. A ello se suma la evidencia que sustenta el daño colateral de diversos fármacos actualmente utilizados para tratar dichas enfermedades. Sin embargo, es importante mencionar que se requieren mayores esfuerzos en cuanto a seguridad, legislación y regulación de productos naturales, con la finalidad de establecer las dosis efectivas que se han de utilizar de extractos, polvo de semilla, suspensiones e infusiones, que garanticen la seguridad del consumidor. También es necesario incentivar, por medio de trabajo colaborativo entre la agroindustria y la academia, el registro de patentes que sean de interés para la industria farmacéutica. Lo anterior abre un abanico de posibilidades para revalorar la palma datilera, sus productos y subproductos en las zonas donde se cultiva; y en países como México, donde la cultura de consumo aún no se tiene arraigada, incentivar esta actividad, dando a conocer los múltiples beneficios nutricionales y potenciales efectos a la salud del consumidor. Ello podría mejorar la economía de las zonas donde se produce el fruto, e incentivar este cultivo en zonas donde las condiciones climáticas favorecen su cultivo. Durante su producción, el aprovechamiento integral sigue siendo un desafío; sin embargo, en este documento se presentan algunas estrategias para sobreponerse a este reto y contribuir al objetivo 12 de desarrollo sustentable establecido por la FAO.

REFERENCIAS

- ABDELAZIZ, D. H., y Ali, S. A. (2014). "The protective effect of *Phoenix dactylifera* L. seeds against CCl₄-induced hepatotoxicity in rats", *Journal of Ethnopharmacology*, 155(1), 736-743.
- ADENEYE, A. A., Adeyemi, O. O., y Agbaje, E. O. (2010). "Anti-obesity and antihyperlipidaemic effect of *Hunteria umbellata* seed extract in experimental hyperlipidaemia", *Journal of Ethnopharmacology*, 130(2), 307-314.
- ALAM, F., Islam, A., Khalil, I., y Hua Gan, S. (2016). "Metabolic control of type 2 diabetes by targeting the GLUT4 glucose transporter: intervention approaches", *Current Pharmaceutical Design*, 22(20), 3034-3049.

- AL-DAIHAN, S. y Bhat, R. S. (2012). "Antibacterial activities of extracts of leaf, fruit, seed and bark of *Phoenix dactylifera*", *African Journal of Biotechnology*, 11(42), 10021-10025.
- AL-FARSI, M., Alasalvar, C., Al-Abid, M., Al-Shoaily, K., Al-Amry, M., y Al-Rawahy, F. (2007). "Compositional and functional characteristics of dates, syrups, and their by-products", *Food Chemistry*, 104(3), 943-947.
- AL-FARSI, M. A., y Lee, C. Y. (2008). "Optimization of phenolics and dietary fibre extraction from date seeds", *Food Chemistry*, 108(3), 977-985.
- ALI-MOHAMED, A. Y., y Khamis, A. S. (2004). "Mineral ion content of the seeds of six cultivars of Bahraini date palm (*Phoenix dactylifera*)", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(21), 6522-6525
- AL-QARAWI, A. A., Abdel-Rahman, H., Mousa, H. M., Ali, B. H., y El-Mougy, S. A. (2008). "Nephroprotective action of *Phoenix dactylifera* in gentamicin-induced nephrotoxicity", *Pharmaceutical Biology*, 46(4), 227-230.
- AL-RASHEED, N. M., Attia, H. A., Mohamad, R. A., Al-Rasheed, N. M., Al-Amin, M. A., y Al-Onazi, A. (2015). "Aqueous date flesh or pits extract attenuates liver fibrosis via suppression of hepatic stellate cell activation and reduction of inflammatory cytokines, transforming growth factor- β 1 and angiogenic markers in carbon tetrachloride-intoxicated rats", *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2015, 1-19.
- AL-SHAHIB, W., y Marshall, R. J. (2003). "The fruit of the date palm: its possible use as the best food for the future?", *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 54(4), 247-259.
- ASHRAF, Z., y Hamidi Esfahani, Z. (2011). "Date and date processing: a review", *Food Reviews International*, 27(2), 101-133.
- AYALA-ZAVALA, J., Vega-Vega, V., Rosas-Domínguez, C., Palafox-Carlos, H., Villa-Rodríguez, J. A., Siddiqui, M. W., y González-Aguilar, G. A. (2011). "Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives", *Food Research International*, 44(7), 1866-1874.
- BALIGA, M. S., Baliga, B. R. V., Kandathil, S. M., Bhat, H. P., y Vayalil, P. K. (2011). "A review of the chemistry and pharmacology of the

- date fruits (*Phoenix dactylifera* L.)”, *Food Research International*, 44(7), 1812-1822.
- BARADARAN, A., Nasri, H., y Rafieian-Kopaei, M. (2015). “Protection of renal tubular cells by antioxidants: current knowledge and new trends”, *Cell Journal (Yakhteh)*, 16(4), 568.
- BESBES, S., Drira, L., Blecker, C., Deroanne, C., y Attia, H. (2009). “Adding value to hard date (*Phoenix dactylifera* L.): compositional, functional, and sensory characteristics of date jam”, *Food Chemistry*, 112(2), 406-411.
- BOUHLALI, E. D. T., Alem, C., Ennassir, J., Benlyas, M., Mbark, A. N., y Zegzouti, Y. F. (2017). “Phytochemical compositions and antioxidant capacity of three date (*Phoenix dactylifera* L.) seeds varieties grown in the South East Morocco”, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(4), 350-357.
- BOUHLALI, E. D. T., Hmidani, A., Bourkhis, B., Khouya, T., Ramchoun, M., Filali Zegzouti, Y., *et al.* (2020). “Phenolic profile and anti-inflammatory activity of four Moroccan date (*Phoenix dactylifera* L.) seed varieties”, *Heliyon*, 6(2), e03436.
- CHANDRASEKARAN, M., y Bahkali, A. H. (2013). “Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera*) fruit processing by-products and wastes using bioprocess technology. Review”, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(2), 105-120.
- CHIKEZIE, P. C., Ojiako, O. A., y Nwufu, K. C. (2015). “Overview of anti-diabetic medicinal plants: the Nigerian research experience”, *Journal Diabetes & Metabolism*, 6(6), 1000546.
- DIAB, K. A. S., y Aboul-Ela, E. (2012). “*In vivo* comparative studies on antigenotoxicity of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) pits extract against DNA damage induced by N-Nitroso-N-methylurea in mice”, *Toxicology International*, 19(3), 279-286.
- ECHEGARAY, N., Pateiro, M., Gullón, B., Amarowicz, R., Misihairabgwi, J. M., y Lorenzo, J. M. (2020). “Phoenix dactylifera products in human health. A review”, *Trends in Food Science & Technology*, 105, 238-250.
- EDDINE, L. S., Segni, L., Nouredine, G., Redha, O. M., y Sonia, M. (2014). “Scavenging effect, anti-inflammatory and diabetes related enzyme inhibition properties of leaves extract from selected

- varieties of *Phoenix dactylifera L.*”, *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research*, 6(1), 66-73.
- EL AREM, A., Thouri, A., Zekri, M., Saafi, E. B., Ghrairi, F., Zakhama, A., y Achour, L. (2014). “Nephroprotective effect of date fruit extract against dichloroacetic acid exposure in adult rats”, *Food and Chemical Toxicology*, 65, 177-184.
- EL FOUHIL, A. F., Ahmed, A. M., Atteya, M., Mohamed, R. A., Moustafa, A. S., y Darwish, H. H. (2013). “An extract from date seeds stimulates endogenous insulin secretion in streptozotocin-induced type I diabetic rats”, *Functional Foods in Health and Disease*, 3(11), 441-446.
- FAO (2020). “Statistical databases”. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://faostat.fao.org>.
- FELDMAN, M., Friedman, L. S., y Brandt, L. J. (eds.) (2017). *Sleisenger y Fordtran. Enfermedades digestivas y hepáticas: fisiopatología, diagnóstico y tratamiento*. Elsevier Health Sciences.
- FORMAN, H. J., Davies, K. J., y Ursini, F. (2014). “How do nutritional antioxidants really work: nucleophilic tone and para-hormesis versus free radical scavenging *in vivo*”, *Free Radical Biology and Medicine*, 66, 24-35.
- GÓMEZ, M., y Martínez, M. M. (2018). “Fruit and vegetable by-products as novel ingredients to improve the nutritional quality of baked goods”, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2119-2135.
- HABIB, H. M., e Ibrahim, W. H. (2009). “Nutritional quality evaluation of eighteen date pit varieties”, *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(sup1), 99-111.
- HABIB, H. M., e Ibrahim, W. H. (2011). “Effect of date seeds on oxidative damage and antioxidant status *in vivo*”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(9), 1674-1679.
- HABIB, H. M., Kamal, H., Ibrahim, W. H., y Al Dhaheri, A. S. (2013). “Carotenoids, fat soluble vitamins and fatty acid profiles of 18 varieties of date seed oil”, *Industrial Crops and Products*, 42, 567-572
- HABIB, H. M., Platat, C., Meudec, E., Cheynier, V., e Ibrahim, W. H. (2014). “Polyphenolic compounds in date fruit seed (*Phoenix*

- dactylifera*): characterisation and quantification by using UPLC-DAD-ESI-MS”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(6), 1084-1089.
- HANIGAN, M. H., y Devarajan, P. (2003). “Cisplatin nephrotoxicity: molecular mechanisms”, *Cancer Therapy*, 1, 47-61.
- HILARY, S., Tomás-Barberán, F. A., Martínez-Blázquez, J. A., Kizhakkiyil, J., Souka, U., Al-Hammadi, S., y Platat, C. (2020). “Polyphenol characterisation of *Phoenix dactylifera* L. (date) seeds using HPLC-mass spectrometry and its bioaccessibility using simulated in-vitro digestion/Caco-2 culture model”, *Food Chemistry*, 311, 125969.
- HMIDANI, A., Bourkhis, B., Khouya, T., Ramchoun, M., Filali-Zegzouti, Y., y Alem, C. (2020). “Phenolic profile and anti-inflammatory activity of four Moroccan date (*Phoenix dactylifera* L.) seed varieties”, *Heliyon*, 6(2), e03436.
- JAYAPRAKASAM, B., Vanisree, M., Zhang, Y., Dewitt, D. L., y Nair, M. G. (2006). “Impact of alkyl esters of caffeic and ferulic acids on tumor cell proliferation, cyclooxygenase enzyme, and lipid peroxidation”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(15), 5375-5381.
- JUBAYER, F., Kayshar, S., y Rahaman, M. (2020). “Effects of Ajwa date seed powder on serum lipids in humans: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial”, *Journal of Herbal Medicine*, 24, 100409.
- JUHAIMI, F. A., Ghafoor, K., y Özcan, M. M. (2012). “Physical and chemical properties, antioxidant activity, total phenol and mineral profile of seeds of seven different date fruit (*Phoenix dactylifera* L.) varieties”, *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 63(1), 84-89.
- KHAN, S. A., Al Kiyumi, A. R., Al Sheidi, M. S., Al Khusaibi, T. S., Al Shehhi, N. M., y Alam, T. (2016). “*In vitro* inhibitory effects on α -glucosidase and α -amylase level and antioxidant potential of seeds of *Phoenix dactylifera* L.”, *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 6(4), 322-329.
- KHAN, T. J., Kuerban, A., Razvi, S. S., Mehanna, M. G., Khan, K. A., Almulaiky, Y. Q., y Faidallah, H. M. (2018). “*In vivo* evaluation of

- hypolipidemic and antioxidative effect of 'Ajwa' (*Phoenix dactylifera* L.) date seed-extract in high-fat diet-induced hyperlipidemic rat model", *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 107, 675-680.
- KIM, S. H., Jun, C. D., Suk, K., Choi, B. J., Lim, H., Park, S., y Shin, T. Y. (2006). "Gallic acid inhibits histamine release and pro-inflammatory cytokine production in mast cells", *Toxicological Sciences*, 91(1), 123-131.
- KIMATA, M., Shichijo, M., Miura, T., Serizawa, I., Inagaki, N., y Nagai, H. (2000). "Effects of luteolin, quercetin and baicalein on immunoglobulin E-mediated mediator release from human cultured mast cells", *Clinical and Experimental Allergy: Journal of the British Society for Allergy and Clinical Immunology*, 30(4), 501-508.
- KIMURA, Y., Okuda, H., Okuda, T., Hatano, T., Agata, I., y Arichi, S. (1985). "Studies on the activities of tannins and related compounds from medicinal plants and drugs. VII. Effects of extracts of leaves of *Artemisia* species, and caffeic acid and chlorogenic acid on lipid metabolic injury in rats fed peroxidized oil", *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 33(5), 2028-2034.
- LEE, U. E., y Friedman, S. L. (2011). "Mechanisms of hepatic fibrogenesis", *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, 25(2), 195-206.
- MADRIGAL-SANTILLÁN, E., Madrigal-Bujaidar, E., Álvarez-González, I., Sumaya-Martínez, M. T., Gutiérrez-Salinas, J., Bautista, M., y Morales-González, J. A. (2014). "Review of natural products with hepatoprotective effects", *World Journal of Gastroenterology*, 20(40), 14787.
- MAJZOBI, M., Karambakhsh, G., Golmakani, M. T., Mesbahi, G., y Farahnaky, A. (2020). "Effects of Level and particle size of date fruit press cake on batter rheological properties and physical and nutritional properties of cake", *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(1), 121-133.
- MARTÍN-SÁNCHEZ, A. M., Cherif, S., Ben-Abda, J., Barber-Vallés, X., Pérez-Álvarez, J. Á., y Sayas-Barberá, E. (2014). "Phytochemicals in date co-products and their antioxidant activity", *Food Chemistry*, 158, 513-520.

- MASMOUDI-ALLOUCHE, F., Touati, S., Mnafgui, K., Gharsallah, N., El Feki, A., y Allouche, N. (2016). "Phytochemical profile, antioxidant, antibacterial, antidiabetic and anti-obesity activities of fruits and pits from date palm (*Phoenix dactylifera* L.) grown in south of Tunisia", *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 5(3), 15.
- MCDUGALL, G. J., Kulkarni, N. N., y Stewart, D. (2009). "Berry polyphenols inhibit pancreatic lipase activity in vitro", *Food Chemistry*, 115(1), 193-199.
- MIA, M. A. T., Mosaib, M. G., Khalil, M. I., Islam, M. A., y Gan, S. H. (2020). "Potentials and safety of date palm fruit against diabetes: a critical review", *Foods*, 9(11), 1557.
- MILLER, N. J., y Rice-Evans, C. A. (1997). "Factors influencing the antioxidant activity determined by the ABTS^{•+} radical cation assay", *Free Radical Research*, 26(3), 195-199.
- NEHDI, I. A., Sbihi, H. M., Tan, C. P., Rashid, U., y Al-Resayes, S. I. (2018). "Chemical composition of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seed oil from six Saudi Arabian cultivars", *Journal of Food Science*, 83(3), 624-630.
- PATEL, D. K., Kumar, R., Laloo, D., y Hemalatha, S. (2012). "Diabetes mellitus: an overview on its pharmacological aspects and reported medicinal plants having antidiabetic activity", *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2(5), 411-420.
- SALAH, E. B. S. B., El Arem, A., Louedi, M., Saoudi, M., Elfeki, A., Zakhama, A., y Achour, L. (2012). "Antioxidant-rich date palm fruit extract inhibits oxidative stress and nephrotoxicity induced by dimethoate in rat", *Journal of Physiology and Biochemistry*, 68(1), 47-58.
- SÁNCHEZ-ZAPATA, E., Fernández-López, J., Peñaranda, M., Fuentes-Zaragoza, E., Sendra, E., Sayas, E., y Pérez-Alvarez, J. A. (2011). "Technological properties of date paste obtained from date by-products and its effect on the quality of a cooked meat product", *Food Research International*, 44(7), 2401-2407.
- SARYONO, S. (2019). "Date seeds drinking as antidiabetic: a systematic review", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 255(1), 012018.

- SARYONO, S., Taufik, A., Proverawati, A., y Efendi, F. (2019). "Dietary supplementation of *Phoenix dactylifera* L. seeds decrease pro-inflammatory mediators in CCl₄-induced rats", *Journal of Herbmmed Pharmacology*, 8(3), 212-217.
- SEKEROGLU, N., Senol, F. S., Orhan, I. E., Gulpinar, A. R., Kartal, M., y Sener, B. (2012). "In vitro prospective effects of various traditional herbal coffees consumed in Anatolia linked to neurodegeneration", *Food Research International*, 45(1), 197-203.
- SELVAM, A. (2008). "Inventory of vegetable crude drug samples housed in botanical survey of India, Howrah", *Pharmacognosy Reviews*, 2(3), 61.
- SHAH, A., A Dar, T., A Dar, P., A Ganie, S., y A Kamal, M. (2017). "A current perspective on the inhibition of cholinesterase by natural and synthetic inhibitors", *Current Drug Metabolism*, 18(2), 96-111.
- SHARMA, G. N., Dubey, S. K., Sati, N., y Sanadya, J. (2011). "Anti-inflammatory activity and total flavonoid content of *Aegle marmelos* seeds", *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Drug Research*, 3(3), 214-218.
- SIRISENA, S., Ng, K., y Ajlouni, S. (2015). "The emerging Australian date palm industry: date fruit nutritional and bioactive compounds and valuable processing by-products", *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(6), 813-823.
- SIRISENA, S., Ng, K., y Ajlouni, S. (2016). "Antioxidant activities and inhibitory effects of free and bound polyphenols from date (*Phoenix dactylifera* L.) seeds on starch digestive enzymes", *International Journal of Food Studies*, 5(2), 212-223.
- SIRISENA, S., Ajlouni, S., y Ng, K. (2018). "Simulated gastrointestinal digestion and in vitro colonic fermentation of date (*Phoenix dactylifera* L.) seed polyphenols", *International Journal of Food Science & Technology*, 53(2), 412-422.
- SOLAYMAN, M., Ali, Y., Alam, F., Islam, A., Alam, N., Khalil, I., y Hua Gan, S. (2016). "Polyphenols: potential future arsenals in the treatment of diabetes", *Current Pharmaceutical Design*, 22(5), 549-565.

- TALHOUK, R. S., Karam, C., Fostok, S., El-Jouni, W., Y Barbour, E. K. (2007). "Anti-inflammatory bioactivities in plant extracts", *Journal of Medicinal Food*, 10(1), 1-10.
- THOMFORD, N. E., Senthebane, D. A., Rowe, A., Munro, D., Seele, P., Maroyi, A., y Dzobo, K. (2018). "Natural products for drug discovery in the 21st century: innovations for novel drug discovery", *International Journal of Molecular Sciences*, 19(6), 1578.
- TRIGUEROS, L., Wojdyło, A., y Sendra, E. (2014). "Antioxidant activity and protein-polyphenol interactions in a pomegranate (*Punica granatum L.*) yogurt", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(27), 6417-6425.
- TUNDIS, R., Loizzo, M. R., y Menichini, F. (2010). "Natural products as α -amylase and α -glucosidase inhibitors and their hypoglycaemic potential in the treatment of diabetes: an update", *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 10(4), 315-331.
- VALKO, M., Rhodes, C., Moncol, J., Izakovic, M. M., y Mazur, M. (2006). "Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer", *Chemico-Biological Interactions*, 160(1), 1-40.
- VILELLA-ESPLÁ, J. (2004). "Aspectos tecnológicos para el aprovechamiento agroindustrial del dátil de tipo blando", tesis de doctorado, University Miguel Hernández.
- WEI, J., Wu, H., Zhang, H., Li, F., Chen, S., Hou, B., y Duan, H. (2018). "Anthocyanins inhibit high glucose-induced renal tubular cell apoptosis caused by oxidative stress in db/db mice", *International Journal of Molecular Medicine*, 41(3), 1608-1618.
- YASIN, B. R., El-Fawal, H. A., y Mousa, S. A. (2015). "Date (*Phoenix dactylifera*) polyphenolics and other bioactive compounds: a traditional islamic remedy's potential in prevention of cell damage, cancer therapeutics and beyond", *International Journal of Molecular Sciences*, 16(12), 30075-30090.
- YEE, H. S., y Fong, N. T. (1996). "A review of the safety and efficacy of a carbose in diabetes mellitus", *Pharmacotherapy: The Journal of Human Pharmacology and Drug Therapy*, 16(5), 792-805.

Colofón

