

tsia

TEMAS SELECTOS DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS



TSIA

Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

EDITORIA EN JEFE

María Teresa Jiménez Munguía

CONSEJO EDITORIAL

Volumen 16 - 2022

Mónica Dávila Rodríguez

Gabriel A. Cardoso Ugarte

Paola Hernández Carranza

Emma Mani López

Jocksan Morales Camacho

Nohemí Soto Reyes

DISEÑO EDITORIAL

Angélica Cabañas Ramírez

CORRECCIÓN DE ESTILO

Andrea Garza Carbajal

Román Esaú Ocotitla Huerta

Beatriz Ramírez Berttolini

TSIA año 16, volumen 16 (2022) es una publicación anual de la Universidad de las Américas Puebla, realizada y distribuida por el Departamento de Ingeniería Química y Alimentos. Ex hacienda Sta. Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810. Teléfono: (222) 229 2126, www.udlap.mx, mariat.jimenez@udlap.mx. Editora responsable: María Teresa Jiménez Munguía. Responsable de la última actualización de este número: Servicios Web y Administración de Contenidos. Ex hacienda Santa Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810. Fecha de la última modificación: 20 de enero de 2026.

UDLAP[®]





Carta editorial
Volumen 16

07.

Cervezas con adición de frutas y otros ingredientes no tradicionales: características y propiedades

08.

F. Rodríguez-Aguilar y M. M. Ramírez-Rodríguez

Posbióticos de bacterias ácido lácticas y su uso potencial en alimentos funcionales

26.

V. E. Vera-Santander y M. T. Jiménez-Munguía

Importancia del uso de insectos para la alimentación humana y su relevancia en la industria y la seguridad alimentaria

44.

S. Cortazar-Moya y J. I. Morales-Camacho

CONTENIDOS

VOL. 16



Carta editorial

VOL. 16

Estimados lectores,

Es un gusto presentar el volumen 16 de la revista Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos (TSIA), publicación que continúa con la labor de difundir conocimientos actuales en el ámbito de la ciencia y tecnología de los alimentos. Esta edición reúne artículos de revisión desarrollados por estudiantes del Doctorado en Ciencia de Alimentos de la Universidad de las Américas Puebla, como parte de su formación académica.

Los artículos que conforman este número abordan temáticas diversas y de gran interés para el sector alimentario. Se inicia con una revisión sobre el desarrollo de cervezas que incorporan frutas e ingredientes no tradicionales, explorando su impacto en las características sensoriales y funcionales del producto. Posteriormente, se analiza el uso potencial de posbióticos derivados de bacterias ácido lácticas, y se presta especial atención a sus aplicaciones en alimentos funcionales. Finalmente, se incluye una revisión centrada en la importancia del uso de los insectos para la alimentación humana y su relevancia en la industria y seguridad alimentaria.

El desarrollo de esta edición fue posible gracias al trabajo colaborativo entre autores, asesores académicos, comité editorial y personal de apoyo técnico, cuyo compromiso ha permitido mantener la calidad y continuidad de la revista. La diversidad de temas tratados refleja el dinamismo del campo alimentario y el interés por promover soluciones innovadoras y sustentables.

Se espera que el contenido de este volumen sea de utilidad para estudiantes, profesionales e investigadores, y que motive nuevas reflexiones y propuestas en torno al desarrollo científico y tecnológico de los alimentos.

Dra. Ana Eugenia Ortega-Regules

Profesora investigadora
Departamento de Ciencias de la Salud
Universidad de las Américas Puebla

Cervezas con adición de frutas y otros ingredientes no tradicionales:

características y propiedades

F. Rodríguez-Aguilar y M. M. Ramírez-Rodrigues

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correo electrónico: fernanda.rodriguezar@udlap.mx



RESUMEN

La demanda del consumo de productos que ofrecen adecuadas características sensoriales en combinación con beneficios a la salud ha provocado que distintos estudios se enfoquen en su análisis. Actualmente, existe una amplia gama de cervezas a las que se les añaden frutos y otros ingredientes no tradicionales para volverlas únicas y especiales, que llegan a presentar mayor actividad antioxidante que las cervezas convencionales. El objetivo de esta revisión es presentar el impacto de la adición de frutas y otros ingredientes no tradicionales en el contenido total de polifenoles, actividad antioxidante, pH y etanol; así como atributos sensoriales (color, aroma y sabor) de las cervezas, mostrando su dependencia de la cantidad y tipo de presentación del ingrediente añadido, al igual que la etapa en la que dicho ingrediente se añade durante el proceso de elaboración de la cerveza.

Palabras clave: cerveza frutal, polifenoles, elaboración de cerveza, actividad antioxidante.

ABSTRACT

The consumer demand for authentic products that offer good sensory characteristics in combination with health benefits has caused different studies to focus on their analysis. Nowadays, there is a wide range of beers, added with fruits and other non-traditional ingredients, that besides making them unique and special, might also promote antioxidant activity in comparison to conventional beer. The objective of this review is to present the impact of the addition of fruits and other non-traditional ingredients, on the total polyphenol content, antioxidant activity, pH, and ethanol, as well as sensory attributes (color, aroma, and flavor) of beers, showing their dependence on the amount and type of presentation of the added ingredient, as well as the stage at which that ingredient is added during the brewing process.

Keywords: fruit beer, polyphenols, brewing process, antioxidant activity.

INTRODUCCIÓN

La cerveza es una bebida carbonatada popular y de las más consumidas en todo el mundo. Su proceso de elaboración varía en diferentes estilos, haciendo que la fabricación consista en técnicas muy parecidas pero independientes. Actualmente, existen cervezas a las que se les añaden frutas y otros aditivos para volverlas únicas, e incluso ofrecen un mayor contenido de nutrientes que aportan beneficios a la salud (Papazian, 2006; Salanță *et al.*, 2020).

Los autores Nardini y Garaguso (2020) sugieren que la adición de frutas frescas en el proceso de fermentación podría duplicar la actividad antioxidante del producto final provocando un aumento significativo de compuestos bioactivos como ácidos fenólicos y flavonoides. De esta forma, se ha demostrado que el contenido fenólico y la actividad antioxidante de la cerveza final dependen especialmente de la cantidad y calidad de las materias primas utilizadas y del proceso de elaboración; estos compuestos pueden ser responsables de la actividad antioxidante de la cerveza (Salanță *et al.*, 2020). Así, el consumo moderado de cerveza puede tener propiedades antiinflamatorias y antioxidantes (Giacosa *et al.*, 2016). Los antioxidantes de la dieta pueden ayudar a contrarrestar los efectos negativos del estrés oxidativo, y los polifenoles son de los antioxidantes dietéticos más abundantes debido a su presencia en prácticamente todas las frutas y verduras (Nardini y Garaguso, 2020).

Los cuatro ingredientes tradicionales utilizados en la elaboración de cerveza son agua, levadura, cebada malteada y lúpulo (Villacreces *et al.*, 2022). Entre las frutas y otros ingredientes no tradicionales que se llegan a agregar al proceso de elaboración de cerveza se encuentran la cereza, frambuesa, durazno, manzana, cítricos, mango, sauco, piña, fresa, zarzamora, persimón (también conocido como caqui o pèrsimo), uva, ciruela, plátano, pimienta negra, cúrcuma, maíz azul, propóleo, papa morada, entre otros, los cuales llegan a ser usados en diferentes presentaciones y cantidades, como fruta entera, puré, jugo, polvo o extracto. Incluso, el momento de adición de las frutas e ingredientes no tradicionales en el proceso de elaboración de la cerveza pueden variar de acuerdo con los resultados que se busque obtener, como el contenido total de polifenoles, actividad antioxidante, concentración alcohólica y pH; además, la adición de estos ingredientes aporta compuestos aromáticos y puede cambiar las propiedades sensoriales de la bebida como color, sabor y sensación en la boca, que dota a las cervezas frutales de características particulares. El objetivo de este artículo

de revisión es recabar la información actual alrededor de cervezas frutales y otros ingredientes no tradicionales, presentando la relación entre sus propiedades antioxidantes y sensoriales con el proceso de elaboración.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Proceso de elaboración de cerveza

Debido a su gran popularidad, la cerveza se ha convertido en la tercera bebida más consumida, después del agua y el té a nivel mundial (Salanță *et al.*, 2020). Cada uno de sus ingredientes cuenta con distintos compuestos químicos que interactúan entre ellos durante el proceso de elaboración (Villacreces *et al.*, 2022), proceso complejo que se divide en distintas etapas, como se muestra en la figura 1. En el malteado se lleva a cabo la conversión de la cebada en malta, secando la cebada y eliminando basurillas para su almacenamiento, remojo en agua, germinado y horneado para detener la germinación y desarrollar color; así como el triturado que es la molienda de la malta (Eaton, 2006). Una vez terminada la molienda, el grano malteado se somete a cocción (65-67 °C) para realizar la maceración, en la cual los gránulos de almidón se convierten por gelatinización a una forma más susceptible a digestión enzimática, las enzimas que descomponen el almidón son las amilasas; aquí se genera el agua llamada «mosto» que se obtiene mediante filtración. Posteriormente, se realiza el hervido del mosto (95 °C), en donde se esteriliza y se precipitan las proteínas, se añade el lúpulo y el contenido de almidón del mosto se hidroliza mediante un calentamiento (95 °C) con circulación y enfriamiento (Bamforth y Cook, 2019; Emerald *et al.*, 2016; Villacreces *et al.*, 2022). Enseguida, se prepara la levadura y se inocula mezclando con influencia del oxígeno y se transfiere al equipo de fermentación; aquí la levadura metaboliza los azúcares fermentables del mosto y los convierte en alcohol, produciéndose una serie de reacciones químicas y enzimáticas dentro de la célula de la levadura utilizando diferentes azúcares como glucosa, fructosa, sacarosa, maltosa y maltotriosa dependiendo del tipo de granos malteados; en esta etapa también se produce el dióxido de carbono (Emerald *et al.*, 2016). La maduración es la etapa en la que la cerveza se enfría y se almacena para posteriormente retirar la levadura sedimentada y otros precipitantes. Finalmente, la cerveza filtrada se envasa en botellas, latas o barriles (Eaton, 2006; Emerald *et al.*, 2016).

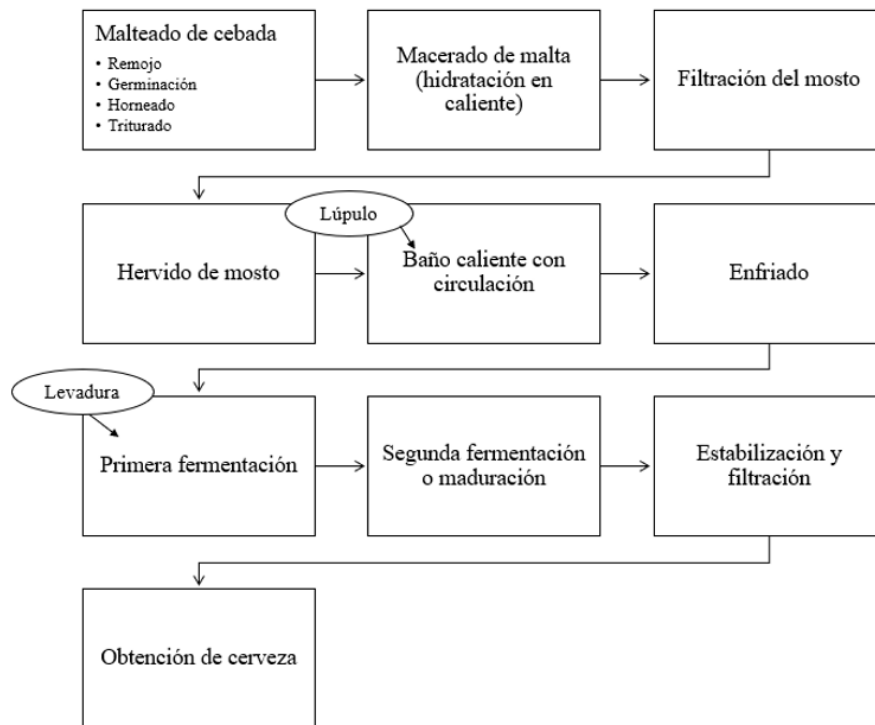


Figura 1.

Proceso general de elaboración de cerveza. Adaptada de Bamforth (2019), Emerald *et al.* (2016) y Villacreces *et al.* (2022).

2. Importancia de los polifenoles y actividad antioxidante en la cerveza

Las sustancias fenólicas de la cerveza se consideran como indicadores de calidad en su procesamiento y comercialización, ya que el tipo y la cantidad de fenoles influyen en el sabor, aroma y color (Wannenmacher *et al.*, 2018). Además, algunos polifenoles se han relacionado con importantes actividades biológicas, incluidas las antioxidantes, anticancerígenas o antimicrobianas (Nardini y Garaguso, 2020).

En la producción de cerveza, los polifenoles naturalmente se derivan de la malta y el lúpulo, aproximadamente el 70-80 % son provenientes de la malta y el 20-30 % del lúpulo (Wannenmacher *et al.*, 2018). En esta producción se llevan a cabo reacciones químicas que influyen en el rendimiento y las características finales de la bebida, entre ellas, la pérdida aproximada del 60 % del contenido fenólico de la malta (Ambra *et al.*, 2021).

Los principales compuestos fenólicos que se han identificado en la cerveza son ácidos fenólicos (ácidos hidroxibenzoico, cinámico y fenilacético), flavonoides (flavonoles, flavonas, flavono-

nas, flavonoles y proantocianidinas) y no flavonoides (estilbenos, calconas, lignanos y taninos hidrolizables). La evaluación del contenido total de polifenoles en la cerveza que se han estudiado durante las distintas etapas del proceso de elaboración están asociados a las diferentes materias primas, como el origen de la malta, variedades de lúpulo, levaduras, tecnologías de malteado y parámetros del proceso de elaboración de la cerveza, así como la escala del proceso ya sea a nivel laboratorio, piloto o industrial; en el ámbito industrial se reducen hasta en un 50 % los taninos y flavonoides (Carvalho y Guido, 2022). Además, los fenoles sufren cambios tanto cuantitativos como cualitativos durante todo el proceso de elaboración de cerveza; en la figura 2 se representa la ruta de los compuestos fenólicos en las fases de malteado y elaboración de cerveza. En la maceración, después de una disminución inicial, la cantidad total de fenoles aumenta de tres a cinco veces; posteriormente, los fenólicos continúan aumentando durante la maceración y la adición del lúpulo, pero disminuyen drásticamente en la ebullición del mosto, el baño caliente con circulación, la fermentación, la maduración, la estabilización y la filtración (Ambra *et al.*, 2021).



Figura 2.

Ruta de los compuestos fenólicos durante las fases de los procesos de malteado y elaboración de cerveza. Adaptada de Ambra *et al.* (2021).

El contenido fenólico y la actividad antioxidante de la cerveza final dependen especialmente de la cantidad y calidad de las materias primas utilizadas y el proceso de elaboración. Incluso, se ha demostrado que el consumo moderado de cerveza puede tener propiedades antiinflamatorias y antioxidantes, presenta ciertos beneficios para la densidad ósea y también puede prevenir las enfermedades coronarias (Salanță *et al.*, 2020). Tomando en cuenta los efectos favorables y desfavorables del alcohol en la salud, la recomendación es no exceder los 30 g de etanol por día para hombres y 15 g para mujeres, es decir, aproximadamente dos vasos de cerveza para hombres y un vaso de cerveza para mujeres (Giacosa *et al.*, 2016).

Adicionalmente, los compuestos fenólicos constituyen una clase importante de metabolitos secundarios, sobre todo en función de su reconocida actividad antioxidante, que confiere calidad al alimento y potencial beneficioso para la salud humana. Estos antioxidantes neutralizan los radicales libres, inhibiendo o interrumpiendo la cadena de inicio-propagación de reacciones oxidativas, convirtiendo los radicales libres en moléculas menos

dañinas y reparando los daños oxidativos en las células humanas. La funcionalidad y estabilidad de estos fitoquímicos en el cuerpo humano dependen no solo de la cantidad, sino también de su ubicación en la matriz alimentaria, de la presencia de otros compuestos bioactivos y, principalmente, de la unión e interacción entre estos compuestos y otras moléculas (Santos-Zea *et al.*, 2019).

3. Cervezas con frutas y otros ingredientes no convencionales

3.1. Estilos de cervezas

Existen distintos estilos de cervezas entre los que destacan: a) *ale* y *stouts* de origen inglés, producidas en Estados Unidos, Escocia, Alemania y Bélgica, y b) *lager* de origen austrohúngaro, producida en Alemania, Suecia, y Estados Unidos. Las cervezas *ale* suelen tener sabores afrutados que son aportados por los ésteres formados en la etapa de fermentación, y las cervezas *lager* generalmente no tienen una concentración alta de ésteres gracias

a las cepas de levadura y las bajas temperaturas de fermentación usadas para su elaboración (Barth, 2013).

La cerveza *lambic* es una cerveza *ale*, proveniente de la región de Bélgica, donde a lo largo de los años se han ido desarrollando y surgiendo diversas contribuciones a la elaboración de cerveza, añadiéndole frutas. Es fermentada de forma natural y espontánea siendo de sabor intensamente afrutada, amarga y frecuentemente tiene notas acéticas. Con bajo contenido de dióxido de carbono, estas cervezas son turbias y se elaboran con trigo sin maltear y/o cebada malteada. Además, son secas y de cuerpo ligero, la levadura *Brettanomyces* suele estar presente en niveles moderados. Algunas de las frutas que se han incorporado son la cereza, grosella negra, melocotón, frambuesa, entre otras. La fruta puede ser usada en diferentes modalidades, ya sea entera, puré o jugo (Bamforth y Cook, 2019; DeKeersmaecker, 1996; Holbrook, 2020; Priest y Stewart, 2006). Por otro lado, la cerveza *porter* de la división *ale* es una bebida de origen inglés de sabor con carácter tostado y maltoso, de color marrón oscuro (Bamforth y Cook, 2019), de la cual se encontró un estudio realizado por Bustos *et al.*, (2019) que adicionaba tola (*Parastrephia lucida*), una planta medicinal.

En la actualidad, frecuentemente se agregan ingredientes adicionales a los elementos básicos de la elaboración de la cerveza, como lactosa, subproductos fermentados de bacterias ácido lácticas, frutas, extractos de plantas, saborizantes, colorantes, edulcorantes, entre otros. Asimismo, las frutas, los jugos y subproductos de estas se usan para hacer surtidos especiales de cervezas con varios sabores y aromas, y al agregar frutas a la cerveza se ofrecen más nutrientes con mayores efectos positivos en la salud. Incluso, se llegan a utilizar ingredientes con beneficio a la calidad, costo y aspectos sensoriales, como color o sabor (Bamforth y Cook, 2019; Salanță *et al.*, 2020).

De acuerdo con Priest y Stewart (2006), para convertir a una cerveza en única o novedosa se le pueden adicionar tanto especias como frutas que aportan compuestos aromáticos únicos e interesantes en el producto final. Sin embargo, es posible que la adición de fruta traiga consigo riesgos y desafíos, pues contiene una variedad de ácidos orgánicos y otros perfiles de levadura; por eso, es importante que la calidad de la fruta sea adecuada

para disminuir el impacto negativo. Además, la contribución de la pectina de la fruta es otro factor a considerarse en el proceso de filtración.

Muchas de las cervezas estudiadas con la adición de frutas, especias y otros ingredientes son de estilo *ale*, entre ellas *lambic* y *porter*, los cuales han sido adicionados ingredientes como baya de goji, jamaica, persimón, cereza, frambuesa, durazno, chabacano, uva, ciruela, naranja, manzana, omija, tola, membrillo, cúrcuma y maíz; y con menor incidencia *lager* con la adición de berenjena, como se observa en la tabla I.

3.2. Condiciones de proceso

En comparación con el proceso tradicional, la adición de ingredientes adjuntos se realiza en distintas partes del proceso, de acuerdo con el objetivo que se quiera obtener en cada cerveza, como se especifica en la figura 3. En los estudios analizados, se encontraron cinco momentos diferentes de adición a lo largo de la elaboración de la cerveza: macerado, previo a ebullición de mosto, previo a primera fermentación, previo a segunda fermentación y posterior a segunda fermentación (tabla I).

El objetivo de cada etapa de adición de los diferentes ingredientes es único; en el macerado se lleva a cabo el tratamiento de la malta y otros materiales amiláceos con agua caliente que permiten que las enzimas hidrolicen el almidón a azúcar. En la ebullición del mosto y adición del lúpulo, se eliminan los microorganismos no deseados, se coagula la proteína adicional y se cambian las moléculas de las resinas de lúpulo a compuestos solubles; además, se eliminan los componentes de sabor no deseados, el oxígeno disuelto y cualquier sustancia volátil que provenga de procesos anteriores (Barth, 2013). En la etapa de fermentación, el mosto se traspa a un recipiente fermentador y se añade la levadura para producir etanol, dióxido de carbono y energía para sus procesos vitales; en la primera fermentación se asimilan la mayoría de los carbohidratos del mosto y la fermentación secundaria se lleva a cabo después de la transferencia de la cerveza desde el fermentador primario con un poco de levadura y carbohidratos fermentables presentes, durante la cual se asimilan los carbohidratos residuales (Barth, 2013; Munroe, 2006).

Tabla I. Cervezas con la adición de diferentes frutos e ingredientes no tradicionales, sus compuestos fenólicos totales, actividad antioxidante, pH y alcohol, de acuerdo con la etapa del proceso de adición y cantidad de ingrediente

Fruto	Versión del fruto	Tipo de cerveza	Cantidad de fruto	Etapa de proceso de adición de fruto	pH	Alcohol (% vol.)	TPC (mg GAE/L)	Actividad antioxidante				Referencia
								ORAC (mmol/L TE)	TEAC (mmol/L TE)	ABTS (mmol /L TE)	FRAP (mmol /L TE)	
Baya de goji ¹	Deshidratada entera	Ale ámbar	50 g/L	Previo a ebullición de mosto	N. d.	7.10 ± 0.04	623 ± 16	16.84 ± 0.86	3.70 ± 0.27	N. d.	N. d.	Ducruet <i>et al.</i> , 2017
			50 g/L	Previo a primera fermentación		7.35 ± 0.05	373 ± 19	15.04 ± 1.71	2.87 ± 0.22			
			50 g/L	Previo a segunda fermentación		7.30 ± 0.05	415 ± 17	13.13 ± 0.82	2.95 ± 0.25			
	Deshidratada molida		50 g/L	Previo a ebullición de mosto		7.26 ± 0.06	609 ± 44	16.81 ± 0.42	3.82 ± 0.25			
			11 g/L	Posterior a segunda fermentación		5.91 ± 0.03	357 ± 14	10.03 ± 0.44	2.40 ± 8.87			
Jamaica (<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.)	Extracto secado por aspersión	Ale	5 g/L	Posterior a segunda fermentación	3.47 ± 0.10	N. d.	410.62 ± 33.63	N. d.	N. d.	6.0	N. d.	Martínez, Vegara, Herranz-López, <i>et al.</i> , 2017
		Ale	10 g/L		3.02 ± 0.10	N. d.	606.53 ± 10.28			6.0		
		Ale	20 g/L		2.73 ± 0.10	N. d.	743.16 ± 7.02			9.28		
Persimón (<i>Diospyros kaki</i> Thunb.)	Jugo	Ale	75:25 % (mosto/persimón)	Previo a fermentación	N. d.	3.64 ± 0.11	433.32 ± 34.30	N. d.	N. d.	2.17	N. d.	Martínez, Vegara, Martí, <i>et al.</i> , 2017
		Ale	50:50 % (mosto/persimón)		4.58 ± 0.08	4.72 ± 0.15	308.85 ± 33.40			3.10		
		Ale	25:75 % (mosto/persimón)		5.73 ± 0.14	5.63 ± 0.16	290.34 ± 9.63			6.30		
Cereza (<i>Prunus avium</i> L., <i>Griotta</i>)	N. d.	Ale	300 g/L cerveza	Previo a primera fermentación	3.71	6.0	767 ± 13	N. d.	N. d.	3.53 ± 0.06	9.76 ± 0.11	Nardini y Garaguso, 2020
Cereza (<i>Prunus Avium</i> L., <i>Corniole</i> , <i>Ravenna</i> y <i>Graffione</i>)	N. d.	Ale	200 g/L cerveza		3.86	5.8	747 ± 8	N. d.	N. d.	3.41 ± 0.10	8.55 ± 0.04	

Tabla I. Cervezas con la adición de diferentes frutos e ingredientes no tradicionales, sus compuestos fenólicos totales, actividad antioxidante, pH y alcohol, de acuerdo con la etapa del proceso de adición y cantidad de ingrediente (continuación)

Fruto	Versión del fruto	Tipo de cerveza	Cantidad de fruto	Etapa de proceso de adición de fruto	pH	Alcohol (% vol.)	TPC (mg GAE/L)	Actividad antioxidante				Referencia
								ORAC (mmol/L TE)	TEAC (mmol/L TE)	ABTS (mmol/L TE)	FRAP (mmol/L TE)	
Frambuesa (<i>Rubus idaeus L.</i>)	N. d.	Lambic	300 g/L cerveza	Previo a primera fermentación	3.76	5.0	465 ± 6	N. d.	N. d.	2.35 ± 0.04	5.71 ± 0.09	Nardini y Garaguso, 2020
Frambuesa (<i>Rubus idaeus L.</i>)	N. d.	Ale	100 g/L cerveza		3.64	5.8	536 ± 7	N. d.	N. d.	1.98 ± 0.01	4.87 ± 0.11	
Durazno (<i>Prunus persica L., Volpedo</i>)	N. d.	Ale	200 g/L cerveza		4.02	8.0	510 ± 5	N. d.	N. d.	1.86 ± 0.03	4.56 ± 0.06	
Chabacano (<i>Prunus armeniaca L., Costigliole Saluzzo</i>)	N. d.	Ale	200 g/L cerveza		3.60	7.0	454 ± 12	N. d.	N. d.	1.66 ± 0.04	4.20 ± 0.05	
Uva (<i>Vitis vinifera L., Croatina</i>)	N. d.	Ale	200 g/L cerveza		4.02	8.0	631 ± 10	N. d.	N. d.	2.81 ± 0.01	6.85 ± 0.18	
Ciruela (<i>Prunus domestica L., Ramassin</i>)	N. d.	Ale	200 g/L cerveza		3.56	7.0	598 ± 7	N. d.	N. d.	1.93 ± 0.02	5.66 ± 0.02	
Naranja (<i>Citrus sinensis L., Sorrento</i>)	Cáscara	Ale	5 g/L cerveza		4.86	6.0	639 ± 4	N. d.	N. d.	2.67 ± 0.09	5.65 ± 0.04	
Manzana (<i>Malus domestica L., Casolana</i>)	N. d.	Ale	20 g/L cerveza		4.42	5.2	399 ± 11	N. d.	N. d.	1.62 ± 0.02	3.08 ± 0.07	
Plátano (<i>M. cavendishii</i>)	Jugo con tratamiento enzimático	N. d.	Mosto con adjunto de plátano (12 °P)	Macerado	5	5.30	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.	Carvalho et al., 2009
			Mosto con adjunto de plátano (15 °P)		5	6.39						

Tabla I. Cervezas con la adición de diferentes frutos e ingredientes no tradicionales, sus compuestos fenólicos totales, actividad antioxidante, pH y alcohol, de acuerdo con la etapa del proceso de adición y cantidad de ingrediente (continuación)

Fruto	Versión del fruto	Tipo de cerveza	Cantidad de fruto	Etapa de proceso de adición de fruto	pH	Alcohol (% vol.)	TPC (mg GAE/L)	Actividad antioxidante				Referencia
								ORAC (mmol/L TE)	TEAC (mmol/L TE)	ABTS (mmol /L TE)	FRAP (mmol /L TE)	
Mango (<i>Mangifera indica</i>)	Jugo	N. d.	20 % (v/v)	Previo a segunda fermentación	3.77 ± 0.02	4.13 ± 0.02	267.6 ± 6.9	N. d.	N. d.	1.74 ± 0.21	1.69 ± 0.14	Gasiński, Kawa-Rygielska, Szumny, Czubaszek, et al., 2020
	Pulpa				3.67 ± 0.02	4.27 ± 0.01	218.6 ± 4.8			1.25 ± 0.12	1.32 ± 0.06	
	Cubos frescos				3.60 ± 0.01	4.63 ± 0.02	233.1 ± 6.1			1.27 ± 0.15	1.48 ± 0.07	
	Homogeneizado fresco				3.58 ± 0.02	4.62 ± 0.02	243.2 ± 6.8			1.46 ± 0.08	1.56 ± 0.05	
	Homogeneizado con tratamiento térmico				3.62 ± 0.01	4.49 ± 0.03	232.2 ± 2.9			1.32 ± 0.13	1.47 ± 0.07	
Omija (<i>Schisandra chinensis</i>)	Deshidratada molida	Ale	2 g/L mosto	Previo a ebullición del mosto	4.05 ± 0.03	5.20 ± 0.10	606.82 ± 16.64	N. d.	N. d.	N. d.	3.01 ± 0.05	Deng et al., 2020
				Previo a primera fermentación	4.22 ± 0.03	5.10 ± 0.10	575.00 ± 12.45				2.40 ± 0.15	
				Posterior a segunda fermentación	4.36 ± 0.02	5.10	568.73 ± 13.57				1.86 ± 0.08	
Espino punteado (<i>Crataegus punctata</i>)	Jugo	N. d.	10 % (v/v)	Previo a segunda fermentación	3.5 ± 0.02	3.5	410.1 ± 11.8	N. d.	N. d.	2.041 ± 0.12	1.35 ± 0.02	Gasiński, Kawa-Rygielska, Szumny, Gąsior et al., 2020
	Fruta				3.7 ± 0.01	3.72	279.6 ± 2			1.356 ± 0.11	0.869 ± 0.01	
Cereza cornalina (<i>Cornus mas L.</i>)	Jugo de fruta amarilla 16 % (v/v) de extracto	N. d.	10 % mosto	Previo a primera fermentación	N. d.	5.05 ± 0.01	N. d.	N. d.	N. d.	5.08 ± 0.01	1.58 ± 0.29	Kawa-Rygielska et al., 2019
	Jugo de fruta coral 15 % (v/v) de extracto	N. d.			N. d.	4.89 ± 0.02				4.79 ± 0.03	1.13 ± 0.03	
	Jugo de fruta roja 18 % (v/v) de extracto	N. d.			N. d.	5.09 ± 0.01				5.23 ± 0.08	1.78 ± 0.03	

Tabla I. Cervezas con la adición de diferentes frutos e ingredientes no tradicionales, sus compuestos fenólicos totales, actividad antioxidante, pH y alcohol, de acuerdo con la etapa del proceso de adición y cantidad de ingrediente (continuación)

Fruto	Versión del fruto	Tipo de cerveza	Cantidad de fruto	Etapa de proceso de adición de fruto	pH	Alcohol (% vol.)	TPC (mg GAE/L)	Actividad antioxidante				Referencia		
								ORAC (mmol/L TE)	TEAC (mmol/L TE)	ABTS (mmol/L TE)	FRAP (mmol/L TE)			
Cereza cornalina (<i>Cornus mas L.</i>)	Jugo de fruta amarilla 16 % (v/v) de extracto	N. d.	10 % mosto	Previo a segunda fermentación	N. d.	5.04 ± 0.01	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.	5.67 ± 0.04	2.27 ± 0.02	Kawa-Rygielska et al., 2019	
	Jugo de fruta coral 15 % (v/v) de extracto	N. d.			N. d.	5.08 ± 0.04					4.77 ± 0.06	1.95 ± 0.07		
	Jugo de fruta roja 18 % (v/v) de extracto	N. d.			N. d.	5.05 ± 0.02					6.51 ± 0.81	2.6 ± 0.02		
Tola (<i>Parastrephia lucida</i>)	Hoja deshidratada	Porter	5 % (p/v)	Previo a segunda fermentación	N. d.	5.3	800.64 ± 4	N. d.	N. d.	N. d.	30.58 ± 1.2	3.34 ± 0.11	5.46 ± 0.04	Bustos et al., 2019
			1 % (p/v)			5.2	559.52 ± 3				13.46 ± 0.76	1.76 ± 0.10	2.49 ± 0.08	
			0.5 % (p/v)			5.2	496.83 ± 4.49				10.60 ± 1.2	1.53 ± 0.09	2.38 ± 0.04	
			0.1 % (p/v)			5.3	480.16 ± 1.12				10.14 ± 0.76	1.38 ± 0.03	2.17 ± 0.08	
Membrillo (<i>Cydonia oblonga Miller</i>)	Pulpa variedad Vranja	Ale	10 % (p/v)	Previo a primera fermentación	4.33	5.62	15.90 ± 1.15*	N. d.	N. d.	N. d.	79.3	N. d.	N. d.	Zapata et al., 2019
	Pulpa variedad PUM				4.28	5.52	16.74 ± 1.12*				114.6			
	Pulpa variedad ZM9				4.33	5.51	17.55 ± 1.18*				127.5			
Berenjena (<i>Solanum melongena L.</i>)	Extracto en polvo de cáscara	Lager	1 mg/ml cerveza	Posterior a segunda fermentación	4.78 ± 0.04	6.50 ± 0.82	439 ± 13	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.	93 ± 1	N. d. N. d.	Horincar et al., 2020
			5 mg/ml cerveza			6.52 ± 0.95	544 ± 7					129 ± 4		
			10 mg/ml cerveza			6.54 ± 0.23	631 ± 3					140 ± 5		
Uva lambrusco ²	Mosto de fruta	Ale	5 %	Previo a primera fermentación	3.74	5.04	291	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.	Castro-Marin et al., 2021	
			10 %		3.67	5.37	304							
			20 %		3.59	6.12	338							

Tabla I. Cervezas con la adición de diferentes frutos e ingredientes no tradicionales, sus compuestos fenólicos totales, actividad antioxidante, pH y alcohol, de acuerdo con la etapa del proceso de adición y cantidad de ingrediente (continuación)

Fruto	Versión del fruto	Tipo de cerveza	Cantidad de fruto	Etapa de proceso de adición de fruto	pH	Alcohol (% vol.)	TPC (mg GAE/L)	Actividad antioxidante				Referencia
								ORAC (mmol/L TE)	TEAC (mmol/L TE)	ABTS (mmol /L TE)	FRAP (mmol /L TE)	
Cúrcuma (<i>Curcuma longa</i> L.)	Extracto, polvo infundido en forma de extracto alcohólico	Ale	1.0 g/L cerveza	Segunda fermentación	4.34 ± 0.20	5.03 ± 0.21	284.52	N. d.	N. d.	N. d.	337.67	Nunes-Filho <i>et al.</i> , 2021
Pimienta negra (<i>Piper Nigrum</i> L.)			1.5 g/L cerveza		4.37 ± 0.01	5.00 ± 0.14	272.74				316.68	
Maíz (<i>Zea mays</i> L.) y Chile guajillo (<i>Capsicum annum</i>)	Grano de maíz azul malteado	Ale	1:1 (maíz malteado/ malta de cebada) Chile guajillo N. d.	Macerado	N. d.	5.45	849.5	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.	Romero-Medina <i>et al.</i> , 2020
	Grano de maíz rojo malteado				N. d.	7.21	721					
Propóleo ³	Extracto	N. d.	0.05 g/L cerveza	Posterior a segunda fermentación	4.06 ± 0.05	5.18 ± 0.16	253.0 ± 19.8	N. d.	N. d.	0.705 ± 0.123	1555 ± 175.4	Ulloa <i>et al.</i> , 2017
			0.15 g/L cerveza		4.02 ± 0.07	5.15 ± 0.17	282.5 ± 28.9			0.687 ± 0.094	1705.0 ± 13.5	
			0.25 g/L cerveza		4.05 ± 0.06	5.18 ± 0.16	306.5 ± 45.9			0.808 ± 0.197	1892 ± 251.0	
Papa morada (<i>Ipomoea batatas</i> L.)	Deshidratada en hojuelas	N. d.	30 % en relación con malta	Macerado	3.05 ± 0.05	3.77 ± 0.06	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.	N. d.	Panda <i>et al.</i> , 2015
			50 % en relación con malta		3.40 ± 0.02	3.37 ± 0.06						

*TPC (mg pirogalol/100 g). ¹Nombre científico no mencionado por autores. Podría ser la especie *Lycium barbarum* o *Lycium chinense*. ²Nombre científico no mencionado por autores. Podría ser la especie *Vitis labrusca*. ³Nombre científico no mencionado por autores. TPC = Contenido total de polifenoles, GAE = Equivalentes de ácido gálico, ORAC = Método que mide actividad antioxidante con la capacidad de absorción de radicales de oxígeno, TEAC = Método que mide capacidad antioxidante equivalente al Trolox, ABTS = Método que mide capacidad antioxidante cuantificando la decoloración del radical ABTS⁺ (2,2'-azino-bis- (3-etil benzotiazolin-6-sulfonato de amonio) debido a su reducción ABTS, FRAP = Método que mide capacidad antioxidante fundamentado en la reducción del hierro férrico (Fe³⁺) en el reactivo de FRAP hasta la forma ferrosa (Fe²⁺) por presencia de antioxidantes, N. d. =No determinado por autores.

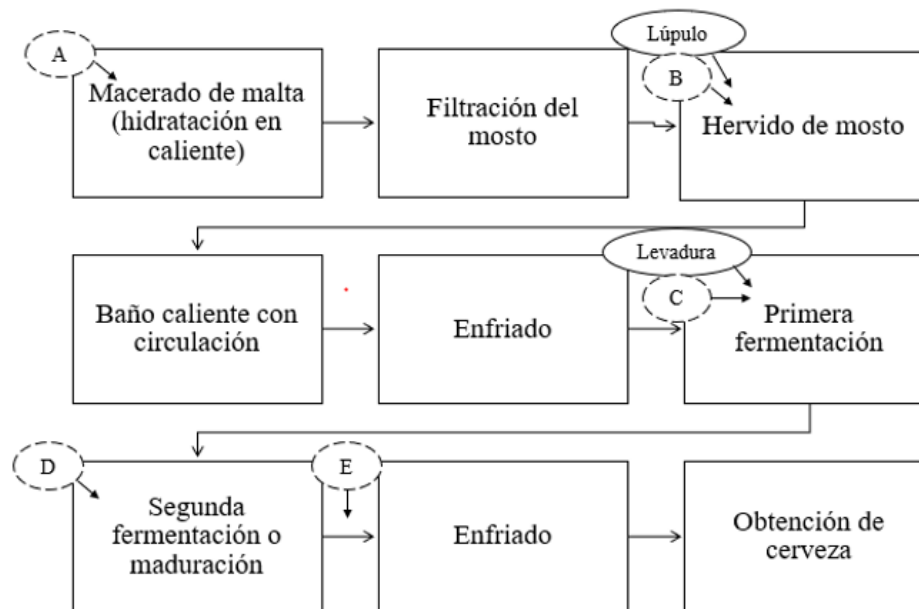


Figura 3.

Proceso general de elaboración de cerveza frutal, en donde: A representa la adición del fruto en la etapa de macerado de la malta; B, la adición del fruto previo al hervido del mosto; C, la adición del fruto previo a la primera fermentación; D, la adición del fruto previo a la segunda fermentación; y E, la adición del fruto posterior a la segunda fermentación.

3.3. Propiedades sensoriales

Debido a la amplia variedad de cervezas que existen, su percepción sensorial se vuelve muy amplia y compleja, y se pueden dividir en sensaciones ópticas, olfativas y gustativas (Schmelzle, 2009). Además, en la elaboración de cerveza existen múltiples variables en el procesamiento que pueden influir en la percepción de sabor, aroma, apariencia, sensación en la boca y carácter general de la cerveza (Papazian, 2006).

3.3.1. Color

En la cerveza convencional el color es una característica que transmite mensajes importantes al consumidor, principalmente cuando se presenta en botella o se sirve en vaso; el color oscuro se asocia con un sabor más fuerte, mayor contenido de alcohol y mayor pesadez, mientras que el color claro transmite lo contrario

(Schmelzle, 2009). De igual forma, el color surge a partir de la selección de materias primas presentes en el proceso de la molienda de la malta y puede aumentar o disminuir en la etapa de ebullición del mosto. Sin embargo, el color se puede ajustar con la adición de caramelos o extractos de malta, generalmente después de la fermentación. Además, el color se aporta gracias a la reacción de Maillard, la cual es impulsada por el calor entre los azúcares y los aminoácidos, aportando incluso sabor (Holbrook, 2020; Schmelzle, 2009).

En un estudio se analizaron cervezas frutales en donde su color se vio afectado por la presencia de frutas, tipo de malta y concentración de lúpulo; así como el proceso de elaboración y momento de adición del fruto en el proceso; se demostró que a mayor cantidad de fruta añadida se pueden obtener cervezas más ligeras y que la etapa de adición llega a influir en el color.

Las frutas añadidas a estas cervezas fueron cerezas, frutos rojos, frambuesa, durazno, manzana, cítricos, mango, sauco, piña, fresa y zarzamora; los colores tornaron desde amarillentos en la cerveza añadida con durazno hasta café muy oscuros en la cerveza adicionada con cereza; y se encontraron antocianinas monoméricas y betacarotenos como pigmentos en estas cervezas frutales (Baigts-Allende *et al.*, 2021).

De igual manera, Martínez, Vegara, Herranz-López *et al.* (2017) estudiaron el comportamiento del color al agregar extracto de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) al proceso de elaboración de cerveza, y en las pruebas con mayor contenido de extracto (10 y 20 g/L), la evolución de la pérdida de color rojo fue significativamente diferente debido al envejecimiento forzado, en donde hubo pérdida de antocianinas, y en el caso de la menor cantidad de extracto añadida (5 g/L) ocurrió pérdida de color en menor intensidad debido a que los complejos antocianinos se presentaron en menor ímpetu. En el caso de cerveza preparada con persimón a diferentes concentraciones de jugo (75:25, 50:50, 25:75 mosto-persimón), la bebida con más contenido de jugo reflejó mayor saturación de color debido a la abundancia de carotenoides (Martínez, Vegara, Martí, *et al.*, 2017). Ello demostró que, a mayor cantidad de fruto añadido, existe alta variabilidad en el color de la cerveza final y además durante la vida de anaquel se debe tener cuidado, pues el envejecimiento natural de la cerveza puede cambiar la coloración del producto.

Por otra parte, en el análisis realizado a cerveza con omija (*Schisandra chinensis*) se evaluaron características de la bebida en distintas etapas de adición del fruto, dando como resultado una cerveza más oscura con un color rojo más intenso que se adjudica a la formación de productos coloreados de la reacción de Maillard y al incremento de extracción de compuestos de color por la alta temperatura, en la etapa previa a la ebullición del mosto (Deng *et al.*, 2020).

En la elaboración de cervezas con ingredientes no tradicionales como pimienta negra (*Piper Nigrum* L.), cúrcuma (*Curcuma longa* L.), tola (*Parastrephia lucida*) y extracto de propóleo en donde la cantidad del ingrediente añadido es mínimo, el color se puede ver ligeramente afectado, pero sin encontrar diferencia significativa contra las cervezas control elaboradas en cada uno de los estudios. De forma contraria sucede en la cerveza elaborada con la adición de extracto de cáscara de berenjena; en la cual

la cantidad añadida fue mínima, pero naturalmente el fruto contiene compuestos antocianinos que dieron color rojizo a la bebida (Bustos *et al.*, 2019; Horincar *et al.*, 2020; Nunes Filho *et al.*, 2021; Ulloa *et al.*, 2017). De aquí que comprobar la naturaleza de los ingredientes es de alta importancia para predecir los compuestos de la bebida final.

3.3.2. Sabor, aroma y compuestos volátiles

La percepción del sabor es una relación conjunta entre el gusto y el aroma, que puede modificarse por la sensación simultánea de estímulos gustativos. En bebidas alcohólicas como cerveza, vino y whisky han sido identificados más de 1,300 compuestos volátiles, así que el sabor de la cerveza es complejo y dinámico, dependiente de diversos factores que pueden promover cambios sensoriales (Ryder y Power, 2006).

En estudios realizados a cervezas con adición de frutas y otros ingredientes no tradicionales se encontraron componentes volátiles, como ésteres, alcoholes, monoterpenos, hidrocarburos, acetales, aldehídos, fenilpropanoides, sesquiterpenos, ácidos y cetonas.

Los ésteres representan al grupo más grande e importante de las sustancias activas del sabor y aroma producidas por levaduras, siendo los responsables del carácter afrutado/floral de la cerveza. Los ésteres se forman intracelularmente por una reacción de condensación catalizada por enzimas entre dos sustratos: un alcohol superior y una molécula acil-coenzima A activada; entonces, la elección de la levadura es importante, ya que determinadas cepas pueden producir características sensoriales diferentes en la bebida final (Papazian, 2006; Russell, 2006).

En la cerveza con mango añadido (*Mangifera indica*) se detectaron veintiocho compuestos de ésteres, doce compuestos de alcoholes, diez compuestos de monoterpenos, cinco compuestos de hidrocarburos, tres compuestos de acetales, tres compuestos de fenilpropanoides, dos compuestos de sesquiterpenos, dos compuestos de aldehídos, un compuesto de ácido y un compuesto de cetona. Además, la cerveza preparada con pulpa de mango obtuvo la mayor concentración de componentes volátiles y se detectó el terpinoleno, el compuesto en mayor cantidad en la bebida, que es caracterizado por un aroma cítrico dulce, lo cual demuestra que la adición de fruta, en este caso el mango, provoca cambios en los compuestos aromáticos de la bebida final pre-

parada, comparada contra una bebida control sin fruta añadida (Gasiński, Kawa-Rygielska, Szumny, Czubaszek, *et al.*, 2020).

En el caso de cerveza preparada con la adición de omija (*Schisandra chinensis*) previo a la ebullición del mosto, el contenido de diacetilo y acetaldehído aumentó ligeramente, mientras que los contenidos de alcoholes superiores se vieron poco afectados y los ésteres mostraron una disminución, en comparación con la cerveza control en el estudio de Deng *et al.* (2020). Dicho resultado es contrario a lo mencionado por Priest y Stewart (2006), quienes dicen que la fruta no debe hervirse, sino que se puede adicionar al mosto caliente una vez apagado el proceso de calentamiento o en el baño caliente con circulación; ya que, si se agrega al mosto caliente, gran parte del aroma proveniente de la fruta se puede perder debido a la volatilización o a la evolución del dióxido de carbono durante la fermentación.

Por otro lado, la adición de frutas o jugo de espino (*Crataegus punctata*) a la cerveza genera diferentes compuestos (éster hexílico de ácido acético; éster 2-metil, 2-metilbutílico de ácido propanoico, limoneno, 5-metilhexanoato de etilo; éster metílico de ácido octanoico, hexanoato de isopentilo) respecto con la cerveza control, incluso hubo aumento de casi todos los compuestos volátiles de la cerveza (Gasiński, Kawa-Rygielska, Szumny, Gąsior, *et al.*, 2020).

En el estudio de Daenen *et al.* (2008) se evaluó y comparó la actividad de hidrolasa de glucósido de las levaduras *Brettanomyces custersii* LD72 con las de *S. cerevisiae* (LD25 y LD40) en glucósidos de cereza agria para su uso en la producción de cerveza; en donde la levadura *B. custersii* LD72 obtuvo un aumento de compuestos volátiles, liberando aromas de cereza agria, como benzaldehído, linalol y eugenol; además, se demostró una mayor formación de compuestos en fruta añadida de forma entera.

En el caso de cerveza con membrillo, de igual manera, se obtuvo mayor intensidad de atributos sensoriales florales, afrutados y menor intensidad de notas de caramelo, en comparación con la cerveza control; esto evidenció que la adición del fruto obtuvo efectos positivos en el sabor floral y afrutado de la cerveza (Zapata *et al.*, 2019).

También es importante tomar en cuenta las cantidades relativas de los diferentes azúcares asimilables en el mosto, pues tienen una influencia significativa en el perfil de sabor. Por ejemplo, el mosto con mayor contenido de glucosa y fructosa produce

mayor cantidad de ésteres que el mosto con un alto contenido de maltosa; como sucedió en el caso de la adición de plátano en la elaboración de cerveza desde la fase de maceración (Carvalho *et al.*, 2009). Igualmente sucede con el porcentaje de alcohol, se puede observar en la tabla I que los mayores porcentajes de alcohol se obtuvieron con la adición de más cantidad de fruta, como sucedió con la cerveza preparada con baya de goji, previo a la primera fermentación (Ducruet *et al.*, 2017), plátano en la maceración (Carvalho *et al.*, 2009), uva lambrusco previo a la primera fermentación (Castro Marín *et al.*, 2021), grano de maíz rojo malteado en la maceración (Romero-Medina *et al.*, 2020) y persimón previo a la primera fermentación (Martínez, Vegara, Martí *et al.*, 2017), dado que estos ingredientes son ricos en azúcares y el contenido de alcohol depende del azúcar reductor inicial y concentración en las formulaciones.

De forma general, el uso de ingredientes alternos a los tradicionales en la elaboración de cerveza, tanto de frutas como de especias, plantas, flores y propóleo, pueden cambiar el aroma y sabor de la bebida final, de acuerdo con el momento de adición durante proceso, cantidad y versión del fruto.

La fruta, el lúpulo y las especias son ingredientes que pueden aportar compuestos aromáticos únicos e interesantes a la bebida final; no obstante, dichos aditivos conllevan una serie de desafíos y consideraciones, como la variedad de ácidos orgánicos que agregan una amplia gama de complejidad y características complementarias a otros ingredientes o perfiles de levaduras usadas. Así, comprender la calidad de los adjuntos que se añaden al proceso de elaboración de la cerveza y su impacto en otros parámetros clave como la calidad del mosto, azúcares, pH, compuestos bioactivos y aspectos sensoriales es igual de importante que seleccionar una cepa de levadura que fermenta de forma confiable el mosto (Holbrook, 2020).

3.4. Propiedades antioxidantes

La adición de diferentes plantas, frutas y otros ingredientes no tradicionales en el mosto o en la cerveza se practica desde hace muchos años, y representa un tesoro de componentes bioactivos que se convierten en materias primas muy valiosas. Las frutas llegan a incorporar antioxidantes como carotenoides, tocoferoles y ácido ascórbico, que pueden ser responsables de la actividad antioxidante de la cerveza (Salanță *et al.*, 2020).

Se ha demostrado que la adición de frutas frescas a la cerveza en el proceso de fermentación podría duplicar su actividad antioxidante, provocando un aumento significativo de compuestos bioactivos como ácidos fenólicos y flavonoides. Por ejemplo, en una cerveza convencional se pueden obtener un total de polifenoles de entre 321.0-446.0 mg de equivalentes de ácido gálico/L, mientras en una cerveza añadida con fruta entre 399.0-767.0 mg de equivalentes de ácido gálico/L, impactando en la actividad antioxidante (Nardini y Garaguso, 2020).

Incluso, en otros estudios, se demostró un contenido total de polifenoles de 800.6 mg de equivalentes de ácido gálico/L en la elaboración de una cerveza de estilo *porter* con la adición de hoja deshidratada al 5 % (p/v) de tola (*Parastrephia lucida*), añadida en la etapa posterior a la segunda fermentación, y 849.5 mg de equivalentes de ácido gálico/L en la elaboración de una cerveza estilo *ale* con la adición de maíz azul (*Zea mays L.*) malteado y chile guajillo (*Capsicum annum*) en la etapa de macerado (Bustos *et al.*, 2019; Romero-Medina *et al.*, 2020). Naturalmente la planta de tola (*Parastrephia lucida*) es rica en antioxidantes (TPC, 185.1 mg GAE/g) (Bustos *et al.*, 2019) y el maíz azul y rojo tienen la presencia de compuestos fenólicos como cianidina-3-glucósido y pelargonidina-3-glucósido, respectivamente (Romero-Medina *et al.*, 2020). En el caso de la cerveza preparada con la adición de maíz azul y rojo, no se llevó a cabo la determinación de actividad antioxidante, lo cual sería interesante conocer debido a que es la cerveza con mayor contenido de polifenoles totales, y así se podría comparar contra la adicionada con tola (*Parastrephia lucida*), que es la segunda bebida con mayor contenido de polifenoles totales.

La adición de extracto de jamaica (*Hibiscus sabdariffa L.*) a la cerveza en diferentes cantidades, en la etapa posterior a la segunda fermentación, incrementó de forma importante los fenoles y antocianinas, que son los compuestos con actividad antioxidante; principalmente, en la cerveza con la adición de 20 g/L de extracto. En este estudio se obtuvo un rango de 6.0-

9.3 mmol/L TE como valores de las actividades de captación de cationes radicales ABTS de las cervezas estudiadas, demostrando tener mayor actividad antioxidante que la cerveza sin la adición de extracto preparado bajo las mismas condiciones (Martínez, Vegara, Herranz-López, *et al.*, 2017).

Otro ejemplo de la adición de ingredientes no tradicionales a la cerveza en diferentes cantidades es el jugo de persimón (75:25, 50:50, 25:75 mosto-persimón), en donde se obtuvieron 433.3±34.3, 308.9±33.4 y 290.3±9.6 mg GAE/L, respectivamente. Se observó que, en este caso, la contribución del total de polifenoles no es representativa de acuerdo con la cantidad de jugo añadida, ya que el jugo de persimón no es una fuente rica de polifenoles (Martínez, Vegara, Martí *et al.*, 2017).

Respecto a las cervezas preparadas con la adición de frutas en diferentes partes del proceso, se encuentran la baya de goji y omija (*Schisandra chinensis*), ambas de forma deshidratada; en estos casos la mayor obtención del contenido total de polifenoles y actividad antioxidante se realizó cuando fueron añadidas previo a la ebullición del mosto (Deng *et al.*, 2020; Ducruet *et al.*, 2017).

De esta manera, se puede asumir que el contenido total de polifenoles y la actividad antioxidante de las cervezas con sus aditivos depende de la calidad y cantidad de los ingredientes, así como de las condiciones del proceso de elaboración (tabla I).

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Se recabó información relacionada con el proceso de elaboración, propiedades antioxidantes y características de cervezas adicionadas con frutas y otros ingredientes no tradicionales. En cuanto al proceso de elaboración de la cerveza, las investigaciones muestran que el momento de adición, tipo de presentación y variedad de fruto o ingrediente influyen en el contenido total de polifeno-

les y actividad antioxidante de las cervezas. Por otro lado, el pH y el grado alcohólico dependen directamente de las características intrínsecas del tipo de ingrediente adicionado; mientras que el pH es influenciado por la cantidad de ingrediente añadido, y el porcentaje de etanol es influenciado por el contenido de azúcares de la bebida previo a la fermentación.

Con respecto a las características sensoriales, se encontró que el sabor y aroma son consecuencia de la presencia de diferentes combinaciones de componentes volátiles, como ésteres, alcoholes, monoterpenos, hidrocarburos, acetales, aldehídos, fenilpropanoides, sesquiterpenos, ácidos y cetonas. Además, para el color es importante conocer los pigmentos de los ingredientes añadidos que darán lugar a la coloración de la bebida final.

En las investigaciones recopiladas se reportó que las cervezas adicionadas con frutas y otros ingredientes no tradicionales demostraron una mayor actividad antioxidante que las cervezas convencionales. Sin embargo, como perspectivas de estudio, es importante continuar con investigaciones que lleven a cabo ensayos clínicos *in-situ* o *in-vivo* y así evaluar el efecto antioxidante en las células. Por otro lado, la mayoría de los estudios se han realizado alrededor de cervezas elaboradas en laboratorio, por lo tanto, comprobar los efectos de la adición de los distintos ingredientes en cada una de las etapas de elaboración a nivel piloto o industrial mostraría el impacto en los componentes bioactivos de la bebida final.

AGRADECIMIENTOS

Fernanda Rodríguez Aguilar agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)— y a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por el financiamiento otorgado para sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Ambra, R., Pastore, G. y Lucchetti, S. (2021). The role of bioactive phenolic compounds on the impact of beer on health. *Molecules*, 26(2), 486. <https://doi.org/10.3390/molecules26020486>
- Baigts-Allende, D. K., Pérez-Alva, A., Ramírez-Rodrigues, M. A., Palacios, A. y Ramírez-Rodrigues, M. M. (2021). A comparative study of polyphenolic and amino acid profiles of commercial fruit beers. *Journal of Food Composition and Analysis*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103921>
- Bamforth, C. W. y Cook, D. J. (2019). *Food, Fermentation, and Micro-organisms* (2a edición). Blackwell.
- Barth, R. (2013). The chemistry of beer. In *ACS Symposium Series* (1130). <https://doi.org/10.1021/bk-2013-1130.ch004>
- Bustos, L., Soto, E., Parra, F., Echiburú-Chau, C. y Parra, C. (2019). Brewing of a Porter Craft Beer Enriched with the Plant *Parastrephia lucida*: A Promising Source of Antioxidant Compounds. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 77(4), 26-266. <https://doi.org/10.1080/03610470.2019.1644478>
- Carvalho, D. O. y Guido, L. F. (2022). A review on the fate of phenolic compounds during malting and brewing: Technological strategies and beer styles. *Food Chemistry*, 372, 131093. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131093>
- Carvalho, G. B. M., Silva, D. P., Bento, C. V., Vicente, A. A., Teixeira, J. A., Felipe, M. D. G. A. y Almeida e Silva, J. B. (2009). Banana as Adjunct in Beer Production: Applicability and Performance of Fermentative Parameters. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 155(1-3), 53-62. <https://doi.org/10.1007/s12010-008-8458-y>
- Castro-Marin, A., Baris, F., Romanini, E., Lambri, M., Montevecchi, G. y Chinnici, F. (2021). Physico-chemical and sensory characterization of a fruit beer obtained with the addition of Cv. Lambrusco grapes must. *Beverages*, 7(2), 1-18. <https://doi.org/10.3390/beverages7020034>
- Daenen, L., Sterckx, F., Delvaux, F. R., Verachtert, H. y Derdelinckx, G. (2008). Evaluation of the glycoside hydrolase activity of a *Brettanomyces* strain on glycosides from sour cherry (*Prunus cerasus* L.) used in the production of special fruit beers. *FEMS Yeast Research*, 8(7), 1103-1114. <https://doi.org/10.1111/j.1567-1364.2008.00421.x>

- DeKeersmaecker, J. (1996). The mystery of lambic beer. *Scientific American*, 275, 74-80.
- Deng, Y., Lim, J., Nguyen, T. T. H., Mok, I. K., Piao, M., y Kim, D. (2020). Composition and biochemical properties of ale beer enriched with lignans from *Schisandra chinensis* Baillon (omija) fruits. *Food Science and Biotechnology*, 29(5), 609-617. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00714-5>
- Ducruet, J., Rébenaque, P., Diserens, S., Kosińska-Cagnazzo, A., Héritier, I. y Andlauer, W. (2017). Amber ale beer enriched with goji berries - The effect on bioactive compound content and sensorial properties. *Food Chemistry*, 226, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.047>
- Eaton, B. (2006). An Overview of brewing. In F. Priest & G. Stewart (Eds.), *Handbook of Brewing* (2a edición, pp. 77-89). Taylor & Francis Group.
- Emerald, M., Rajauria, G. y Kumar, V. (2016). Novel Food Fermented Grain-Based Products. En K. S. Ojha y B. K. Tiwari (Eds.), *Novel Food Fermentation Technologies* (pp. 263-277). Springer International Publishing Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42457-6_1
- Gasiński, A., Kawa-Rygielska, J., Szumny, A., Czubaszek, A., Gąsior, J. y Pietrzak, W. (2020). Volatile Compounds Content, Physicochemical Parameters, and Antioxidant Activity of Beers with Addition of Mango Fruit (*Mangifera Indica*). *Molecules*, 25(13), 3033. <https://doi.org/10.3390/molecules25133033>
- Gasiński, A., Kawa-Rygielska, J., Szumny, A., Gąsior, J. y Głowacki, A. (2020). Assessment of Volatiles and Polyphenol Content, Physicochemical Parameters and Antioxidant Activity in Beers with Dotted Hawthorn (*Crataegus punctata*). *Foods*, 9(6), 775. <https://doi.org/10.3390/foods9060775>
- Giacosa, A., Barale, R., Bavaresco, L., Faliva, M. A., Gerbi, V., La Vecchia, C., Negri, E., Opizzi, A., Perna, S., Pezzotti, M. y Rondanelli, M. (2016). Mediterranean Way of Drinking and Longevity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(4), 635-640. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.747484>
- Holbrook, C. J. (2020). Brewery operations. In Elsevier (Ed.), *The Craft Brewing Handbook* (pp. 66-109). <https://doi.org/10.1016/c2016-0-03424-1>
- Horincar, G., Enachi, E., Bolea, C., Răpeanu, G. y Aprodu, I. (2020). Value-added lager beer enriched with eggplant (*Solanum melongena* L.) peel extract. *Molecules*, 25(3). <https://doi.org/10.3390/molecules25030731>
- Kawa-Rygielska, J., Adamenko, K., Kucharska, A. Z., Prorok, P. y Piórecki, N. (2019). Physicochemical and antioxidative properties of Cornelian cherry beer. *Food Chemistry*, 281, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.093>
- Martínez, A., Vegara, S., Herranz-López, M., Martí, N., Valero, M., Micol, V. y Saura, D. (2017). Kinetic changes of polyphenols, anthocyanins and antioxidant capacity in forced aged hibiscus ale beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 123(1), 58-65. <https://doi.org/10.1002/jib.387>
- Martínez, A., Vegara, S., Martí, N., Valero, M. y Saura, D. (2017). Physicochemical characterization of special persimmon fruit beers using bohemian pilsner malt as a base. *Journal of the Institute of Brewing*, 123(3), 319-327. <https://doi.org/10.1002/jib.434>
- Munroe, J. H. (2006). Aging and finishing. En F. G. Priest y G. G. Stewart (Eds.), *Handbook of Brewing* (2a edición, pp. 526-548). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781420015171>
- Nardini, M. y Garaguso, I. (2020). Characterization of bioactive compounds and antioxidant activity of fruit beers. *Food Chemistry*, 305, 125437. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125437>
- Nunes Filho, R. C., Galvan, D., Effting, L., Terhaag, M. M., Yamashita, F., Benassi, M. de T. y Spinosa, W. A. (2021). Effects of adding spices with antioxidants compounds in red ale style craft beer: A simplex-centroid mixture design approach. *Food Chemistry*, 365, 0-1. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130478>
- Panda, S. K., Panda, S. H., Swain, M. R., Ray, R. C. y Kayitesi, E. (2015). Anthocyanin-Rich Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Beer: Technology, Biochemical and Sensory Evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 3040-3049. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12569>
- Papazian, C. (2006). Beer Styles: Their origins and classification. En G. G. Stewart y F. G. Priest (Eds.), *Handbook of Brewing* (2a edición, pp. 41-71). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781420015171>
- Priest, Fergus G. y Stewart, G. G. (2006). Handbook of brewing. En *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951-952. (2ª edición, Issue 465). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420015171>
- Romero-Medina, A., Estarrón-Espinosa, M., Verde-Calvo, J. R., Lelièvre-Desmas, M. y

- Escalona-Buendía, H. B. (2020). Renewing Traditions: A Sensory and Chemical Characterization of Mexican Pigmented Corn Beers. *Foods*, 9(7), 886. <https://doi.org/10.3390/foods9070886>
- Russell, I. (2006). Yeast. En G. G. Stewart y F. G. Priest (Eds.), *Handbook of Brewing* (pp. 282-324). Taylor & Francis Group. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420015171>
- Ryder, D. S. y Power, J. (2006). Miscellaneous Ingredients in Aid of the Process. En G. G. Stewart y F. G. Priest (Eds.), *Handbook of Brewing* (pp. 334-378). Taylor & Francis Group CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420015171>
- Salanță, L. C., Coldea, T. E., Ignat, M. V., Pop, C. R., Tofană, M., Mudura, E., Borșa, A., Pasqualone, A., Anjos, O. y Zhao, H. (2020). Functionality of special beer processes and potential health benefits. *Processes*, 8(12), 1-21. <https://doi.org/10.3390/pr8121613>
- Santos-Zea, L., Villera-Castrejón, J. y Gutiérrez-Urbe, J. (2019). Bound phenolics in food-Reference series in phytochemistry. En K. G. Ramawat y J. M. Mérillon (Eds.), *Bioactive Molecules in Food* (pp. 973-990). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78030-6>
- Schmelzle, A. (2009). The Beer Aroma Wheel Related Papers. *Brewing Science*, 62, 26-32.
- Ulloa, P. A., Vidal, J., Ávila, M. I., Labbe, M., Cohen, S. y Salazar, F. N. (2017). Effect of the addition of propolis extract on bioactive compounds and antioxidant activity of craft beer. *Journal of Chemistry*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/6716053>
- Villacreces, S., Blanco, C. A. y Caballero, I. (2022). Developments and characteristics of craft beer production processes. *Food Bioscience*, 45 (December 2021), 101495. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101495>
- Wannenmacher, J., Gastl, M. y Becker, T. (2018). Phenolic Substances in Beer: Structural Diversity, Reactive Potential and Relevance for Brewing Process and Beer Quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 953-988. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12352>
- Zapata, P. J., Martínez-Esplá, A., Gironés-Vilaplana, A., Santos-Lax, D., Nogueira-Artiaga, L. y Carbonell-Barrachina, Á. A. (2019). Phenolic, volatile, and sensory profiles of beer enriched by macerating quince fruits. *Lwt*, 103, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.002>



Posbióticos de bacterias ácido lácticas

y su uso potencial en alimentos funcionales

V. E. Vera-Santander* y M. T. Jiménez-Munguía

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correos electrónicos: victor.verasr@udlap.mx • mariat.jimenez@udlap.mx

RESUMEN

Recientes estudios han demostrado que la viabilidad bacteriana no es indispensable para obtener algunos beneficios en la salud conferidos por las bacterias consideradas probióticos. Dentro de esta evidencia ha surgido el término «posbiótico», refiriéndose a los metabolitos producidos por dichas bacterias, cuyo consumo puede aportar beneficios a la salud del consumidor. Se ha estudiado una gran variedad de posbióticos provenientes de microorganismos probióticos, entre los cuales se incluyen algunas bacterias ácido lácticas (BAL). Adicionalmente, se ha investigado el proceso de obtención de los posbióticos con el propósito de llevarlo a una escala industrial. El uso de posbióticos en los alimentos tiene ventajas tecnológicas con respecto a los probióticos, por lo que pueden ser ingredientes potenciales para el desarrollo de alimentos funcionales. El objetivo del artículo es proporcionar una compilación sobre los posbióticos desde su definición, los tipos que existen, sus beneficios a la salud, el proceso de obtención (producción, inactivación bacteriana, técnicas de extracción, métodos de concentración y métodos analíticos para su identificación), y sus posibles aplicaciones en los alimentos.

Palabras clave: posbióticos, probióticos, BAL y alimentos funcionales.

ABSTRACT

Recent studies have shown that bacterial viability is not indispensable to obtain some benefits from bacteria considered as probiotics. Within this evidence, the term «postbiotic» has emerged, referring to the metabolites produced by these bacteria. The consumption of these can confer benefits to the consumers' health. A wide variety of postbiotics from probiotics, which include some lactic acid bacteria (LAB) have been studied. In addition, the process to obtain postbiotics has been investigated with the purpose of applying it to an industrial scale. The use of postbiotics in food has technological advantages over probiotics, so they can be potential ingredients to develop functional foods. The objective of this article is to provide a review of postbiotics from their definition, their types, health benefits, their processing (production, bacterial inactivation, extraction techniques, concentration methods and analytical methods for their identification), and possible applications in food.

Keywords: postbiotics, probiotic, LAB, and functional foods.

INTRODUCCIÓN

Los probióticos están definidos como aquellos microorganismos que, cuando son consumidos en cantidades adecuadas, pueden proveer beneficios a la salud del consumidor, como el alivio de desórdenes gastrointestinales, ayuda en el tratamiento de alergias, obesidad, depresión, vaginosis bacteriana, enfermedades cancerígenas, entre otros (Cordoba y Hotel, 2001; Zucko *et al.*, 2020). Como se muestra en la figura 1, existen diversos microorganismos que son considerados como probióticos que pertenecen al grupo de las bacterias ácido lácticas (BAL) como el género *Lactobacillus*, *Leuconostoc* y *Streptococcus* (Holzapfel y Wood, 2014; Williams, 2010). Otros microorganismos que no pertenecen a las BAL, pero que son reconocidos como probióticos, son algunas especies de bifidobacterias, *Bacillus cereus*, *Escherichia coli* Nissle y *Saccharomyces boulardii* (levadura) (Williams, 2010). Recientes investigaciones han demostrado que la viabilidad de los probióticos no es necesaria para obtener algunos de sus beneficios para la salud, ya que estos no solo producen ácido láctico sino también una gran variedad de metabolitos, por ejemplo, bacteriocinas, vitaminas, biosurfactantes, etc. (Aguilar-Toalá *et al.*, 2018; Cuevas-González *et al.*, 2020; Hernández-Granados y Franco-Robles, 2020; Nataraj *et al.*, 2020). Así es como surge el término de los posbióticos, refiriéndose a dichos metabolitos producidos por microorganismos probióticos.

Diversos autores han enfatizado el uso de los posbióticos y paraprobióticos (células inactivadas y sus metabolitos) en los alimentos, ya que tienen ciertas ventajas tecnológicas con respecto a los probióticos, como una mejor estabilidad fisicoquímica durante el tiempo de almacenamiento, no requieren condiciones de almacenamiento tan estrictas, pueden ser adicionados en alimentos en los que se aplican tratamientos térmicos, entre otros (Aguilar-Toalá *et al.*, 2018; Sawada *et al.*, 2016; Siciliano *et al.*, 2021). Por lo tanto, la investigación de los posbióticos dentro de la ciencia y la industria alimentaria resulta interesante, ya que pueden ser ingredientes potenciales para el desarrollo de alimentos funcionales (Nataraj *et al.*, 2020).

El objetivo del artículo es proporcionar una compilación sobre los posbióticos desde su definición, los tipos que existen, sus beneficios a la salud, el proceso de obtención (producción, inactivación bacteriana, técnicas de extracción, métodos

de concentración y métodos analíticos para su identificación), y lo más relevante sobre sus posibles aplicaciones en los alimentos funcionales.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Generalidades

Varios investigadores han propuesto diferentes terminologías que describen a los posbióticos, también conocidos como «metabióticos», «biogénicos», «metabolitos» o «sobrenadantes libres de células» (Aguilar-Toalá *et al.*, 2018). Por ejemplo, Tsilingiri y Rescigno (2013) definieron a los posbióticos como «cualquier factor resultante de la actividad metabólica de un probiótico o cualquier molécula liberada capaz de conferir efectos beneficiosos al huésped de forma directa o indirecta». Otra definición es que son compuestos producidos por microorganismos, liberados de los componentes de los alimentos o constituyentes microbianos (incluidas las células no viables) que, cuando son administrados en cantidades adecuadas, promueven la salud y el bienestar (Collado *et al.*, 2019). Johnson *et al.* (2019) han definido a los posbióticos como «productos bacterianos no viables o subproductos metabólicos de microorganismos probióticos que tienen efectos positivos en el huésped o el microbiota». Wegh *et al.* (2019) los definieron como compuestos bioactivos funcionales, generados en una matriz durante la fermentación, que pueden utilizarse para promover la salud. Una de las definiciones más aceptadas y reconocidas en la literatura es la de Aguilar-Toalá *et al.* (2018), pues señalan que son factores solubles (productos o subproductos metabólicos), secretados por bacterias vivas o liberados después de la lisis bacteriana; estos subproductos ofrecen beneficios fisiológicos al huésped al proporcionar bioactividad adicional. En 2021, el panel de consenso de la Asociación Científica Internacional de Probióticos y Prebióticos (por sus siglas en inglés ISAPP) definió al posbiótico como una «preparación de microorganismos inanimados y/o sus componentes que confieren un beneficio a la salud del huésped».

Cabe mencionar que existe otro término denominado «paraprobiótico», que se puede llegar a confundir con los posbióticos. Los paraprobióticos, también conocidos como «probióticos no viables», «probióticos inactivados» o «probióticos fantasmas»,

2. Tipos de posbióticos y sus beneficios

En general, las bacterias producen metabolitos de bajo peso molecular durante su ciclo de vida, y estos compuestos juegan un papel clave en la regulación del crecimiento propio y la reproducción; fomentan el crecimiento de otros organismos beneficiosos; participan en la comunicación de célula a célula, y brindan protección contra factores de estrés (Aguilar-Toalá *et al.*, 2018). Estos metabolitos no solo ayudan a la bacteria, sino también al huésped. Por esta razón, se les han denominado como posbióticos y han ganado un gran interés dentro de la ciencia alimentaria y la salud, especialmente aquellos que provienen de las BAL.

Los posbióticos incluyen una gran variedad de componentes moleculares como vitaminas, ácidos orgánicos, áci-

dos grasos de cadena corta (AGCC), proteínas/péptidos secretados, bacteriocinas, neurotransmisores, biosurfactantes secretados, aminoácidos, compuestos derivados de flavonoides como desaminotirosina, equol daidzeína, daidzeína, nortirriol, terpenoides, compuestos fenólicos, entre otros (Nataraj *et al.*, 2020). Estos compuestos se pueden clasificar, de acuerdo con su composición química, en lípidos (AGCC y plasmalógenos), proteínas (enzimas y péptidos), carbohidratos (ácidos teicoicos y exopolisacáridos), vitaminas y moléculas complejas como los biosurfactantes. En la tabla I se muestran los principales posbióticos que se han estudiado, los probióticos con respecto al componente de interés y sus beneficios en la salud.

Tabla I. Tipos de posbióticos producidos por diferentes probióticos y sus efectos en la salud

Posbiótico de interés	Probiótico	Dosis evaluada	Efectos en la salud	Referencias
Acetato y propionato	<i>Bif. bifidum</i> MF 20/5	125 mM de acetato y 130 μ M de propionato	Efectos metabólicos (control de obesidad).	(LeBlanc <i>et al.</i> , 2017)
	<i>Bif. longum</i> SP 07/3	110 mM de acetato y 125 μ M de propionato		
	<i>Lb. gasseri</i> PA 16/8	60 mM de acetato y 110 μ M de propionato		
	<i>Lb. rhamnosus</i> GG	55 mM de acetato y 100 μ M de propionato		
Acetato, propionato y butirato	<i>Lb. salivarius</i> subsp. <i>salicinii</i> JCM 1230	45 μ M/g de acetato, 5 μ M/g de propionato y 8 μ M/g de butirato	Efectos metabólicos (control de la homeostasis de la glucosa) y antiinflamatorios en el colon.	(Meimandipour <i>et al.</i> , 2010)
	<i>Lb. agilis</i> JCM 1048			
	<i>Lb. acidophilus</i> CRL 1014	42.5 mM/g de acetato, 20 mM/g de propionato y 27 mM/g de butirato	Regulación de la microbiota intestinal.	(Sivieri <i>et al.</i> , 2013)
Ácido lipoteicoico (ALT)	<i>Lb. paracasei</i> D3-5	200 mg/kg*día	Efectos antiinflamatorios, fisiológicos y antienvjecimiento.	(S. Wang <i>et al.</i> , 2020)
	<i>Lb. delbrueckii</i>	3-30 μ g/ml	Efectos antiinflamatorios en el colon.	(Kim <i>et al.</i> , 2017)
	<i>Lb. sakei</i>			
	<i>Lb. rhamnosus</i> GG			
Ácido metilpentadecanoico (Biosurfactante)	<i>Lb. jensenii</i> P6A	0.338 mg	Propiedades antimicrobianas contra patógenos intestinales y urogenitales.	(Morais <i>et al.</i> , 2017)
Ácido eicosanoico (Biosurfactante)	<i>Lb. gasseri</i> P65	1.18 mg		

Tabla I. Tipos de posbióticos producidos por diferentes probióticos y sus efectos en la salud (continuación)

Posbiótico de interés	Probiótico	Dosis evaluada	Efectos en la salud	Referencias
Biosurfactantes (mezcla)	<i>Lb. casei</i> B1	25 mg/ml	Efectos antimicrobianos y antioxidantes.	(Merghni et al., 2017)
Exopolisacáridos	<i>Lb. casei</i> SB27	10-600 µg/ml	Efectos antitumorales.	(Di et al., 2017)
	<i>Lb. fermentum</i> S1	1-4 mg/ml	Actividad contra la formación de biopelículas de patógenos y efectos antioxidantes.	(K. Wang et al., 2020)
	<i>Lb. buchneri</i> TCP016	200-800 mg/kg	Regulación de la microbiota.	(Xu et al., 2019)
	<i>L. lactis</i> subsp. <i>lactis</i>	50, 100 y 150 mg/kg	Efectos antioxidantes e inmunes.	(Guo et al., 2013)
	<i>Lb. rhamnosus</i> GG	46 µg	Escudo protector contra factores inmunes del intestino.	(Lebeer et al., 2011)
Subtilisina y glutamil endopeptidasa (proteasas)	<i>B. pumilus</i>	0.5 U/ml de subtilisina y 0.1 U/ml de glutamil endopeptidasa	Efectos antimicrobianos contra la formación de biopelículas.	(Mitrofanova et al., 2017)
Bacteriocina no identificada	<i>Lb. casei</i>	100 µl de la solución posbiótica	Efectos antimicrobianos contra patógenos resistentes.	(Hasan et al., 2019)
Bacteriocina KT11	<i>Ent. faecalis</i> KT11	178 AU/ml	Efectos antimicrobianos contra patógenos urogenitales y resistentes.	(Abanoz y Kunduhoglu, 2018)
Plasmalógenos	<i>Bif. animalis</i> subsp. <i>lactis</i>	No reportado	Efectos antioxidantes.	(Oberge et al., 2012)
Vitamina B12 (cobalamina)	<i>P. freudenreichii</i> 2067	120-124.8 ng/ml	Efectos en el metabolismo.	(Deptula et al., 2017)
Vitamina B2 (riboflavina)	<i>Lb. brevis</i>	0.5 a 1.5 mg/l en mezcla de los probióticos	No reportado.	(Thakur et al., 2016)
	<i>Lb. fermentum</i>			
	<i>Lb. reuteri</i>			
	<i>Lb. salivarius</i>			

B.: *Bacillus*, Bif.: *Bifidobacterium*, Lb.: *Lactobacillus*, L.: *Lactococcus*, P.: *Propionibacterium*, Ent.: *Enterococcus*.

2.1. Lípidos

Los lípidos más estudiados dentro de los posbióticos son los AGCC y los plasmalógenos. Los AGCC son el resultado de la digestión de prebióticos por la microbiota mediante la fermentación de fibras o carbohidratos no digeribles (Klemashevich et al., 2014). Los AGCC que mayormente se producen durante la fermentación bacteriana son el acetato, butirato y propionato. Los lactobacilos sintetizan a los AGCC desde la fermentación de carbohidratos para

producir piruvato por la vía glucolítica, mientras que las bacterias heterofermentativas como las bifidobacterias lo hacen por la vía fosfocetolasa (Gill et al., 2018). Como se muestra en la tabla I, los probióticos que se han estudiado son principalmente del género *Lactobacillus* y *Bifidobacterium*. LeBlanc et al. (2017) estudiaron la producción de acetato, butirato y propionato de *Bifidobacterium longum* SP07/3, *Bif. bifidum* MF20/5 y *Lactobacillus gasseri* PA, 16/8 y *Lb. rhamnosus* GG. En sus resultados,

la mayor producción de acetato y propionato fue con *Bif. bifidum* con una concentración aproximadamente de 125 mM y 130 μ M, respectivamente; mientras que el *Lb. rhamnosus* GG presentó la menor producción de AGCC con 55 mM de acetato y 100 μ M de propionato. Gill *et al.* (2018) mencionaron que los AGCC tienen efectos antitumorales, antiinflamatorios en el colon, protección contra el desarrollo de trastornos inmunes, control de obesidad, control de la homeostasis de la glucosa, regulación del apetito y efectos cardiovasculares. Ellos han sugerido el uso de los AGCC como probióticos, ya sea en el consumo de fármacos o en la dieta. Cabe mencionar que aún no se ha determinado una dosis mínima de consumo de los AGCC para apreciar los efectos funcionales en la salud, sin embargo, en otro estudio se probó que una bebida de intervención con vinagre de manzana que contenía 25.8 mM de acetato, 0.05 mM de propionato y 0.04 mM de butirato ayudó a reducir la presión sanguínea, mostrando efectos positivos cardiovasculares (Gill *et al.*, 2021).

Los plasmalógenos son un grupo de lípidos con importantes funciones en organismos como bacterias, protozoarios, invertebrados y mamíferos (Řezanka *et al.*, 2012). Las clases predominantes de los plasmalógenos son glicerofosforil etanolamina y glicerofosforilcolina con un vinil éter en la posición del glicerol *sn*-1 en lugar de un ácido graso. Por otro lado, en la posición del glicerol *sn*-2, los plasmalógenos son enriquecidos con un ácido graso poliinsaturado (Wallner y Schmitz, 2011). Los plasmalógenos se han estudiado solo con una especie del género *Bifidobacterium* (tabla 1), siendo *Bif. animalis* subsp. *lactis*, en el cual los plasmalógenos fueron reconocidos como antioxidantes endógenos inducidos por el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sin embargo, la dosis o concentración empleada no fue reportada por Oberg *et al.* (2012). Los efectos que inducen estos compuestos son positivamente involucrados en la neurodegeneración y alivio de enfermedades cardíacas; tiene efectos positivos contra la diabetes tipo dos, obesidad, inflamación y cáncer (Wallner y Schmitz, 2011). En un estudio realizado por Hossain *et al.* (2018) se especificó que el consumo diario de plasmalógenos en pacientes con Alzheimer mejoró la cognición. Esto podría ser debido a que los

plasmalógenos son los principales componentes del tejido neuronal, contribuyendo entre el 50 % y 80 % del total de glicerofosforil etanolaminas de la sustancia gris y blanca del cerebro (Han *et al.*, 2001).

2.2. Proteínas

Las proteínas que se han estudiado en el campo de los probióticos son las enzimas y polipéptidos antimicrobianos. Las enzimas son proteínas activas que catalizan reacciones bioquímicas. Las enzimas microbianas poseen una variedad de funciones bioquímicas, fisiológicas y regulatorias (Hernández-Granados y Franco-Robles, 2020). Contesini *et al.* (2018) mencionan que el género *Bacillus* es probablemente la fuente bacteriana más importante de proteasas, ya que es capaz de producir altas cantidades de enzimas proteolíticas neutras y alcalinas con propiedades destacables como alta estabilidad en temperaturas extremas, pH, solventes orgánicos, detergentes y compuestos oxidantes. En un estudio realizado por Mitrofanova *et al.* (2017) se demostró que las proteasas (subtilisina y glutamil endopeptidasa) de *B. pumilus* causaron la degradación de componentes extracelulares poliméricos y significativamente erradicaron la biopelícula generada por *Serratia marcescens*, conocido como un patógeno oportunista responsable de varias infecciones contraídas en hospitales. Los beneficios en la salud de las proteasas son la protección de las células al estrés oxidativo y efectos contra enfermedades cardíacas y cancerígenas (Hernández-Granados y Franco-Robles, 2020).

Con respecto a los polipéptidos y proteínas, estos probióticos son muy estudiados en la inocuidad alimentaria, ya que algunos presentan propiedades antimicrobianas, por ejemplo, las bacteriocinas. Las bacteriocinas forman poros en las membranas de bacterias e inhiben la síntesis de la pared celular (Hernández-Granados y Franco-Robles, 2020). Existen cinco clases de bacteriocinas, clase I: pequeños péptidos proteolíticos y resistentes al calor sustancialmente modificados por enzimas específicas a nivel transcripcional. Algunos ejemplos son lantibióticos (nisina), sactipéptido y péptidos de bucle (Hols *et al.*,

2019). Clase II: divididas en cuatro subtipos, que son (1) similar a la pediocina, (2) dos péptidos, (3) circulares y (4) lineales no similares a la pediocina. Comprenden péptidos pequeños resistentes a la temperatura y al pH (Hols *et al.*, 2019). Clase III: grandes péptidos (>30 kDa) termolábiles con actividad y estructura compleja. En este grupo se incluyen a la helveticina, acidofilicina y lactacinas (A y B) (Preciado *et al.*, 2013). Clase IV: consiste en complejas proteínas conjugadas con lípidos o carbohidratos. Algunos ejemplos son la lactocina S (glicoproteína) y la mesenterocina (lipoproteína) (Hols *et al.*, 2019; Preciado *et al.*, 2013). Clase V: péptidos con estructuras circulares sin modificaciones postraduccionales, en el cual se incluyen la enterocina AS-48 y gasericina A (Heredia-Castro *et al.*, 2017).

Una de las bacteriocinas más estudiadas y usadas en la ciencia e industria alimentaria es la nisina. Esta bacteriocina es producida por *Lb. lactis* subsp. *lactis* y ha sido aprobada por la FDA como un aditivo generalmente reconocido como seguro (por sus siglas en inglés GRAS) (Nataraj *et al.*, 2020). La nisina ha demostrado propiedades antimicrobianas contra *Staphylococcus aureus*, cepas de *Enterococcus*, *Mycobacterium* y *Streptococcus*, y otros patógenos como *Cutibacterium acnes*, *Mycobacterium smegmatis*, y especies de *Bacillus* y *Clostridium* (Hernández-Granados y Franco-Robles, 2020). Además, se ha demostrado que las bacteriocinas de *Enterococcus faecalis* y *Lb. casei* son efectivas contra patógenos urogenitales, intestinales y resistentes a los antibióticos (Abanoz y Kunduhoglu, 2018; Hasan *et al.*, 2019).

2.3. Carbohidratos

Entre los posbióticos de tipo carbohidrato se encuentran los ácidos teicoicos y exopolisacáridos (EPS). Los ácidos teicoicos son estructuralmente glicopolímeros aniónicos (ribitol) y son constituyentes primarios de la pared celular de las bacterias grampositivas (Van der Es *et al.*, 2017). Estos compuestos juegan papeles muy importantes en la bacterias, como determinar la forma de la célula, regulación de la división celular, y otros aspectos metabólicos fundamentales en la fisiología celular (Nataraj *et al.*, 2020). Existen dos tipos de ácidos teicoicos: los ácidos lipotei-

coicos (LTA por sus siglas en inglés) (anclados en la membrana a través de un glicolípido) y ácidos teicoicos de la pared (WTA por sus siglas en inglés) (covalentemente unidos al peptidoglicano) (Brown *et al.*, 2013). Los LTA han sido más estudiados debido a sus propiedades funcionales inmunes, antitumorales y antioxidantes (Lebeer *et al.*, 2012). Como se muestra en la tabla I, los probióticos que se han estudiado con respecto a los ácidos teicoicos son principalmente del género *Lactobacillus*. En el estudio de Kim *et al.* (2017), observaron que los LTA provenientes de *Lb. delbrueckii*, *Lb. sakei* y *Lb. rhamnosus* GG demostraron tener potenciales efectos antiinflamatorios, probando dosis de 3-30 µg/ml. En adición, los ácidos lipoteicoicos de *Lb. paracasei* D3-5, empleando una dosis de 200 mg/kg*día, presentaron interesantes efectos que beneficiaron las funciones físicas y cognitivas en ratones (Wang *et al.*, 2020).

En cuanto a los EPS, estos son biopolímeros producidos por microorganismos durante su crecimiento y van variando de acuerdo a su grado de ramificación, desde moléculas lineales hasta altamente ramificadas, y en la composición de monosacáridos (Welman y Maddox, 2003). Los EPS se pueden dividir en homopolisacáridos (teniendo monosacáridos idénticos) como celulosa y dextrano, y en heteropolisacáridos (con diferentes monosacáridos) como el xantano (Zhou *et al.*, 2019). En la tabla I se muestran algunos probióticos que se han estudiado para la producción de EPS, además, se presentan los efectos en la salud de estos compuestos, y se exhiben varios atributos funcionales como antioxidantes, efectos de reducción de colesterol, inmunidad, antienvjecimiento, modulación de la microbiota intestinal y antitumorales (Di *et al.*, 2017; Guo *et al.*, 2013; Lebeer *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2019). Se han evaluado diversas concentraciones con el propósito de obtener la dosis para manifestar los beneficios anteriormente mencionados. Se ha observado que dosis de 1-4 mg/ml de EPS derivados de *Lb. fermentum* S1 exhiben potentes actividades antioxidantes y evitan la formación de biopelículas (Wang *et al.*, 2020). Otro ejemplo es el estudio de Di *et al.* (2017), en el cual evaluaron dosis de 10 a 600 µg/ml de EPS provenientes

de *Lb. casei* SB27, se demostró que a mayor concentración de EPS los efectos antitumorales *in vitro* fueron incrementándose; en sus conclusiones resaltaron que estos componentes pueden ser usados como ingredientes potenciales para los alimentos funcionales.

2.4. Vitaminas

Las vitaminas son moléculas orgánicas esenciales en la dieta en pequeñas cantidades para facilitar varios procesos biológicos del cuerpo. La mayoría de las vitaminas B son directamente involucradas como coenzimas en las reacciones energéticas del metabolismo (Nataraj *et al.*, 2020). Nuestro organismo es incapaz de sintetizar la mayoría de las vitaminas, por lo tanto, es necesario consumirlas de forma externa. Los microorganismos probióticos (tabla I) pueden sintetizar una vasta cantidad de vitaminas como la vitamina B₁ (tiamina), vitamina B₂ (riboflavina), vitamina B₉ (ácido fólico), vitamina B₁₂ (cobalamina) y vitamina K (menaquinona) (Hernández-Granados y Franco-Robles, 2020). El uso de los microorganismos en la producción de vitaminas es más viable económicamente que la fortificación con pseudovitaminas químicamente sintetizadas. Deptula *et al.* (2017) mencionaron que es preferible producir la vitamina B₁₂ mediante fermentación microbiana industrial que mediante síntesis química. En adición, ellos realizaron un estudio, en el cual produjeron vitamina B₁₂ de *Propionibacterium freudenreichii* 2067, utilizando un caldo de cultivo a base de suero de leche industrial. En sus resultados, ellos observaron que la fermentación de 168 horas produjo más cantidad de cobalamina (124.8 ng/ml) con el caldo propuesto que en el medio propiónico similar al queso (120.0 ng/ml).

2.5. Moléculas complejas

Los biosurfactantes (BS) son moléculas complejas, ya que representan a una extensa diversidad de polímeros sintetizados durante la fase logarítmica tardía o estacionaria temprana del ciclo de crecimiento de un microorganismo. Se secretan extracelularmente o se unen a la pared celular (Satpute *et al.*, 2016). Entre los BS se encuentran los glucolípidos, lipopéptidos, fosfo-

lípidos, lípidos neutrales, complejos de proteína-polisacáridos y ácidos grasos libres (Nataraj *et al.*, 2020). Como se observa en la tabla I, los probióticos estudiados en relación con los BS han sido del género *Lactobacillus*. Morais *et al.* (2017) investigaron los BS de *Lb. jensenii* P6A y *Lb. gasseri* P6, y observaron que estos compuestos tienen propiedades antimicrobianas contra diversos patógenos (*Escherichia coli*, *Candida albicans*, *Staphylococcus saprophyticus*, *Enterobacter aerogenes* y *Klebsiella pneumonia*), para esto emplearon dosis de 0.338 y 1.18 mg de *Lb. jensenii* P6A y *Lb. gasseri* P65, respectivamente. Fracchia *et al.* (2015) mencionan que los BS exhiben una gran variedad de propiedades como estabilización de emulsiones, capacidad de antiadherencia, anti-biopelícula, anticancerígena, antiviral, inmunológica y antimicrobiana.

3. Proceso de obtención de los posbióticos

Para la obtención de los posbióticos, la mayoría de los investigadores preparan una solución posbiótica, ya sea con o sin lisis celular. Esta solución contiene los metabolitos que fueron sintetizados por la acción de los probióticos sobre el cultivo o ingredientes alimentarios (Moradi *et al.*, 2021). Żółkiewicz *et al.* (2020) argumentan que la calidad y la clase de productos están principalmente relacionados con el tipo de cepa bacteriana, el medio de cultivo, el tratamiento bacteriano después de la propagación, entre otros factores. Actualmente, la producción de los posbióticos se ha realizado a nivel laboratorio, con el fin de obtener las mejores condiciones de producción para una escala industrial. Existen varios puntos importantes, como el medio de fermentación, las condiciones de la propagación bacteriana, el tratamiento de inactivación (si se requiere), y métodos de concentración, preservación y aplicación (Moradi *et al.*, 2021). En la figura 2 se ilustra la preparación y el proceso de obtención de los posbióticos, el cual está dividido en 1) reactivación de los probióticos, 2) propagación bacteriana, 3) tratamiento bacteriano, 4) cosecha posbiótica (con o sin extracción) y 5) concentración posbiótica. Además, en la tabla II se presentan las condiciones de preparación de posbióticos a partir de los reportes de diversos estudios con probióticos.

Tabla II. Métodos de preparación y productos obtenidos de posbióticos a partir de diversos probióticos

Probióticos	Medio de cultivo	Condiciones de crecimiento y extracción	Tratamiento de inactivación	Referencias
<i>Bif. longum</i> SP 07/3 <i>Bif. bifidum</i> MF 20/5 <i>Lb. gasseri</i> PA 16/8 <i>Lb. rhamnosus</i> GG	Caldo MRS	A 37 °C durante 24 h, en condiciones anaerobias para las bifidobacterias. Centrifugación (5,000 g por 10 min a 4 °C) y liofilización.	Ninguno	LeBlanc <i>et al.</i> , 2017
<i>Lb. curvatus</i> BCS35 y <i>Enterococcus faecium</i> BNM58	Caldo MRS	A 30 °C durante 16 h con moderada agitación (160 rpm). Centrifugación (12,000 rpm por 10 min a 4 °C) y liofilización.	Ninguno	Gómez-Sala <i>et al.</i> , 2016
<i>Lb. gasseri</i> CP2305	Leche descremada, extracto de levadura y azúcar	A 37 °C durante 18 h. No se empleó un proceso de extracción ni concentración.	Esterilización a 95 °C por 30 s	Nishida <i>et al.</i> , 2017
<i>Lb. reuteri</i> ATCC 23272	Caldo MRS	A 37 °C durante 48 h en condiciones anaerobias. Centrifugación (2,000 rpm por 15 min a 25 °C).	Irradiación gamma por Cobalto 60 durante 20 h a 8.05 Gy/min	Kamiya <i>et al.</i> , 2006
<i>Lb. fermentum</i> BGHV110	Caldo MRS	A 37 °C en condiciones anaerobias. Centrifugación (5,000 rpm por 10 min).	Altas presiones usando prensa francesa con un número de pasos de tres	Dinić <i>et al.</i> , 2017
<i>Bif. longum</i> BR-108	Caldo MRS con cisteína (0.05 % p/v)	A 35 °C en condiciones anaerobias. No se empleó un proceso de extracción ni concentración.	Esterilización a 105 °C a 20 min	Ben Othman y Sakamoto, 2020
<i>Lb. casei</i> ATCC 393	Caldo MRS	A 37 °C durante 24 h sin agitación. Centrifugación (1,700 g por 15 min a 4°C) y filtración (filtro de 0.22 µm).	Tratamiento térmico a 100 °C por 40 min y ultrasonido a 70 %, amplitud por 10 min	Tiptiri-Kourpeti <i>et al.</i> , 2016
<i>Lb. rhamnosus</i> GG	Caldo MRS	A 37 °C durante 72 h en condiciones anaerobias. No se empleó un proceso de extracción ni concentración.	Rayos UV durante 5 min	Lopez <i>et al.</i> , 2008
<i>Lb. brevis</i> , <i>Lb. buchneri</i> <i>Lb. casei</i> , <i>Lb. paracasei</i> <i>Lb. plantarum</i>	Leche y permeado de leche	A 37 °C durante 48 h. Centrifugación (8,000 g por 15 min) y liofilización.	Ninguno	Garnier <i>et al.</i> , 2019
<i>Bif. longum</i> SPM1207	Caldo MAG	A 37 °C durante 48 h en condiciones anaerobias. Centrifugación (13,000 rpm por 10 min).	Ultrasonido durante 5 min (intensidad no especificada)	Shin <i>et al.</i> , 2010

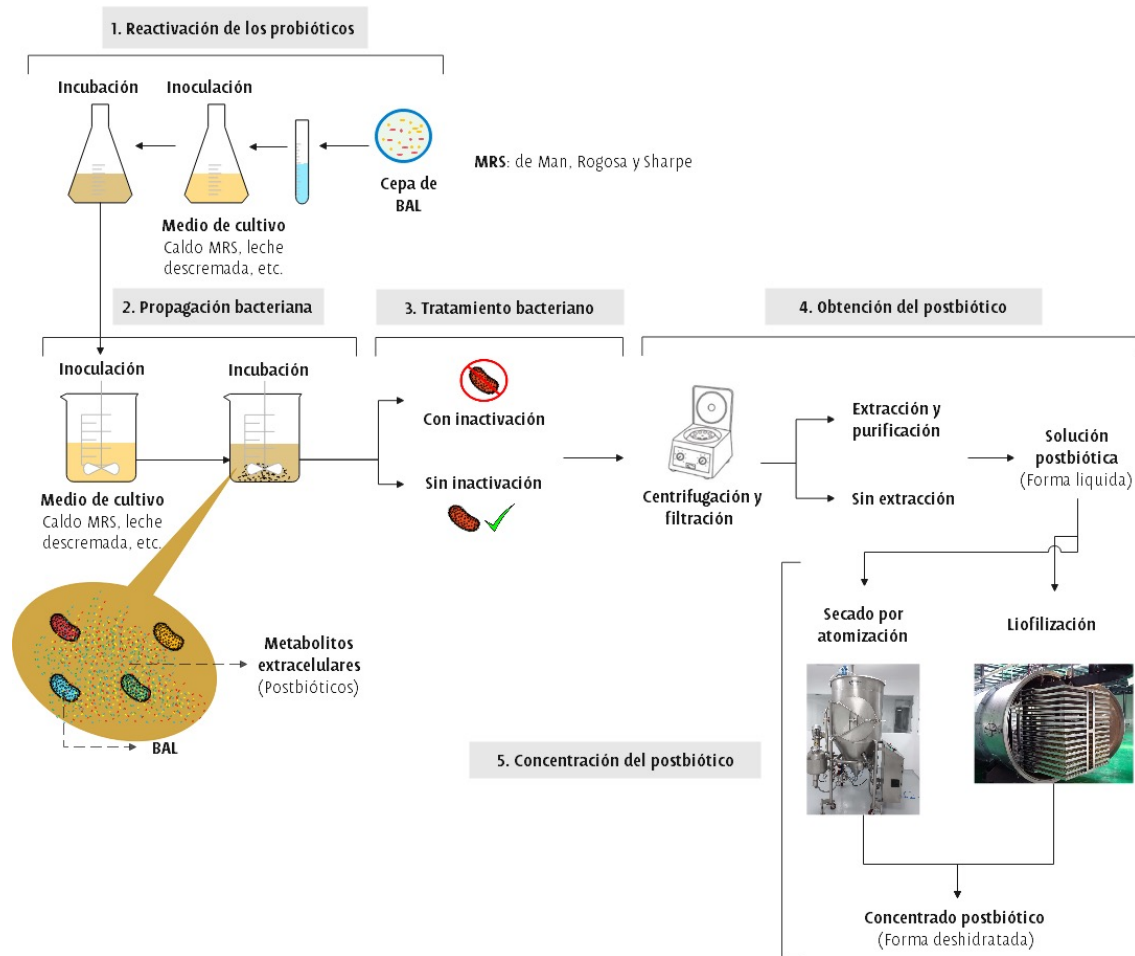


Figura 2.

Preparación y proceso de producción de posbióticos. Adaptada de Moradi *et al.* (2021).

3.1. Medios de cultivo y sustratos para su producción

El medio de cultivo es importante para llevar a cabo una correcta y satisfactoria reactivación y propagación de los probióticos (figura 2), dado que en la propagación es cuando ocurre la producción o síntesis de los posbióticos. Acorde con lo observado en la tabla II, el medio de cultivo más usado en la obtención de posbióticos es el caldo MRS desarrollado por De Man, Rogosa y Sharpe en 1960 (De Man *et al.*, 1960; Moradi *et al.*, 2021). El rango de temperaturas que generalmente se usa para la obtención de posbióticos es de 30-37 °C con un tiempo de fermentación que va desde

las 16 a las 72 horas (tabla II). Los posbióticos preparados con este medio producen un fermentado ácido con un color que va de un café a un amarillo marrón. A pesar de que este medio es ideal para algunos probióticos, presenta una desventaja con respecto a la aplicación de los posbióticos en los alimentos, pues el caldo MRS influye negativamente en sus propiedades organolépticas, especialmente en los productos lácteos (Moradi *et al.*, 2020).

Debido a esto, algunos investigadores han experimentado con medios alternativos para la producción de posbióticos en una escala industrial (tabla II). Garnier *et al.* (2019) experimentaron

con diferentes ingredientes lácteos como la leche a baja temperatura y permeado de leche, optimizando el tiempo y la temperatura de incubación para preparar soluciones posbióticas antifúngicas provenientes de *Lb. brevis*, *Lb. buchneri*, *Lb. casei*, *Lb. paracasei* y *Lb. plantarum* para aplicaciones alimentarias. Otros investigadores han utilizado un medio a base de leche descremada, extracto de levadura y azúcar, con el propósito de preparar una bebida funcional para mejorar el sueño y el estrés (Nishida *et al.*, 2017). En adición, se ha sugerido la suplementación de aditivos en el medio de cultivo convencional con el propósito de promover la producción de un posbiótico deseado. Valga como ejemplo el estudio de Díaz-Vela *et al.* (2012), quienes adicionaron en el medio de cultivo tripticasa de soya, peptona y extracto de levadura (TPY) diferentes concentraciones de albedo de naranja, inulina de agave, inulina de achicoria y glucosa, con el propósito de identificar la fuente de carbono que promueve la producción de AGCC provenientes de *Pediococcus pentosaceus* y *Aerococcus viridans*. En sus resultados, el albedo de naranja al 1.0 % (p/v) fue el mejor sustrato para las dos bacterias evaluadas, ya que tuvo el menor tiempo de duplicación y la mayor producción de ácido láctico, acético y butírico.

3.2. Inactivación microbiana

Después del cultivo del probiótico pueden inactivarse las células, pero este paso es opcional. En la mayoría de los casos se opta por inactivar a las células del cultivo, para así detener los cambios metabólicos realizados por las bacterias (Moradi *et al.*, 2021). La inactivación de las células se lleva a cabo mediante tratamientos físicos o químicos capaces de modificar los componentes celulares (membranas, proteínas, ADN, etc.) y funciones fisiológicas (actividad enzimática y de recuperación) sin destruir completamente la estructura celular (Siciliano *et al.*, 2021). Como se observa en la tabla II, existen tecnologías convencionales y emergentes para dicha inactivación microbiana. Dentro de las convencionales se encuentran los procesos térmicos, los cuales son los más comunes para inactivar microorganismos, que consisten en la aplicación de calor por un cierto periodo de tiempo. Los procesos térmicos dañan la membrana celular, provocando así la fuga de nutrientes e iones, agregación de ribosomas, desnaturación de proteínas y rotura del ADN (De Almada *et al.*, 2016). Por

ejemplo, la pasteurización y la esterilización se han usado para la obtención de paraprobióticos de *Lb. gasseri* CP2305 y *Bif. longum* BR-10 (Ben Othman y Sakamoto, 2020; Nishida *et al.*, 2017).

Con respecto a las tecnologías emergentes, estas se han usado con el propósito de inactivar las células sin dañar a los componentes termolábiles (por ejemplo, vitaminas). Existe una gran variedad de procesos que se han usado en la obtención de posbióticos, en los cuales se incluyen la irradiación, rayos UV, altas presiones y ultrasonido (Dinić *et al.*, 2017; Kamiya *et al.*, 2006; Lopez *et al.*, 2008; Shin *et al.*, 2010; Tiptiri-Kourpeti *et al.*, 2016). La irradiación es la aplicación de radiación ionizante (rayos gamma o rayos-X) que daña los ácidos nucleicos del microorganismo causado por los radicales oxidativos (Kamiya *et al.*, 2006). La exposición de los rayos UV hacia las células induce la formación de fotoproductos del ADN que interrumpen su transcripción y translación (Lopez *et al.*, 2008). Los procesos a altas presiones (>300 MPa) inactivan a los microorganismos debido a que dañan la membrana (lisis celular), desnaturalizan proteínas (inactivación de enzimas y coagulación de proteínas) y reducen el pH intracelular (De Almada *et al.*, 2016). Por último, la sonicación o ultrasonido es una técnica que utiliza ondas sonoras con frecuencias mayores al límite de la audición humana (>16 kHz). El ultrasonido en medios líquidos crea un fenómeno llamado cavitación, que es el aumento de la temperatura y la presión que llevan a la formación de burbujas y cuando estas estallan se provoca la ruptura de la pared celular y perturbaciones en membranas, además de un daño al ADN, debido a la producción de radicales libres (De Almada *et al.*, 2016).

3.3. Extracción y métodos de concentración

Para la etapa de extracción de los posbióticos, la solución posbiótica pasa por un proceso de centrifugación y en algunos casos se llega a filtrar esta solución, con el propósito de separar cualquier remanente o compuesto no deseado (tabla II) (Moradi *et al.*, 2021). Dependiendo de los objetivos de la investigación se puede optar por un proceso de extracción y purificación. Dicho proceso comúnmente se utiliza para la obtención de biosurfactantes (BS), exopolisacáridos (EPS) y bacteriocinas (Nataraj *et al.*, 2020).

La metodología de extracción de los BS involucra un principio de extracción por solventes, el uso de soluciones de me-

tanol y cloroformo, ayuda a recuperar las moléculas polares y no polares, respectivamente. Posteriormente, estas soluciones son evaporadas a baja temperatura para obtener los BS de la membrana y pared celular (Luong *et al.*, 2018). En el caso de los EPS, el sobrenadante se acidifica usando ácido tricloroacético y se precipita con etanol para obtener un suero desprotenizado, luego este suero es purificado mediante técnicas de cromatografía (Fracchia *et al.*, 2015).

En la extracción de bacteriocinas, el sobrenadante debe ser esterilizado por filtración de membrana (0.22 μm) y para evitar la actividad antimicrobiana de los ácidos orgánicos, el pH de la solución es neutralizado en un rango de 6.5-7. Existen tres métodos para purificar las bacteriocinas de los probióticos. El primer método es el convencional, que está conformado por diferentes pasos que son la precipitación de sulfato de amonio, intercambio iónico, interacción hidrofóbica, filtración en gel y cromatografía líquida de alta presión en fase inversa (De Vuyst y Leroy, 2007). El segundo método está comprendido por tres simples pasos: (1) precipitación con sulfato de amonio, (2) extracción/precipitación con cloroformo/metanol y (3) cromatografía líquida de alta presión en fase inversa (De Vuyst y Leroy, 2007). Finalmente, el tercer método implica una adsorción de lecho expandido, utilizando un gel de interacción hidrofóbica, para lo cual es necesario que se ajuste el pH con respecto al medio fermentado (De Vuyst y Leroy, 2007).

Moradi *et al.* (2021) mencionan que los posbióticos pueden ser preparados en forma líquida o seca. Como se ilustra en la figura 2, el último proceso es la concentración del posbiótico. Para esto es necesario emplear tecnologías que sean capaces de deshidratar a las soluciones posbióticas. Dentro de la investigación se han utilizado las tecnologías de liofilización y secado por atomización, ya que esto facilita que los posbióticos tengan una vida útil más prolongada (Dunand *et al.*, 2019).

3.4. Métodos analíticos para su identificación

Los métodos analíticos son esenciales para identificar y cuantificar a los componentes moleculares presentes en los posbióticos, lo que representa un beneficio para la aplicación alimentaria, ya que al conocer qué moléculas están presentes en los posbióticos, se puede definir los efectos o beneficios a la salud que puede aportar el alimento al que fue adicionado (Wegh *et al.*, 2019).

Debido a la complejidad de los posbióticos, se requiere un equipo sofisticado y una preparación de muestra excelsa. Los métodos analíticos que se han utilizado en la investigación son principalmente técnicas de cromatografía de gases, líquida de alta resolución (HPLC por sus siglas en inglés) y de capa fina, además de análisis basados en espectrofotometría, espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) (Moradi *et al.*, 2021).

4. Aplicaciones en alimentos funcionales y los desafíos actuales

Los alimentos funcionales se pueden definir como «cualquier alimento que tiene un impacto positivo en la salud, el rendimiento físico o el estado de ánimo de un individuo, además de su valor nutricional» (Aguiar *et al.*, 2019). La innovación en estos alimentos ha generado una amplia gama de compuestos bioactivos que promueven la salud. Entre estos podemos mencionar a los probióticos, prebióticos, fitoquímicos o hierbas, antioxidantes naturales, péptidos bioactivos, entre otros (Fernandes *et al.*, 2019). El interés de consumir alimentos funcionales ha impulsado económicamente el sector global con más de \$180,000 millones de dólares y se prevé que la demanda mundial aumente en un 8 % anualmente (Ali y Rahut, 2019). Dunand *et al.* (2019) mencionan que los posbióticos tienen ventajas tecnológicas con respecto a los probióticos aplicados en los alimentos, como una vida útil más larga, almacenamiento, manipulación y transportación más factible. Otra ventaja sugerida es que tienen una mejor absorción por el metabolismo y una alta capacidad de señalización a varios órganos y tejidos, además, desencadenan varias respuestas biológicas que benefician al consumidor (Homayouni-Rad *et al.*, 2021).

Actualmente, los posbióticos han sido aplicados en los alimentos con el propósito de mejorar la inocuidad alimentaria. Concretamente, Moradi *et al.* (2020) realizaron una revisión de literatura de las aplicaciones potenciales que tienen los posbióticos de probióticos en la inocuidad, los cuales fueron la biopreservación de alimentos lácteos, cárnicos, vegetales y de panificación; además de su uso en el desarrollo de empaques bioactivos y comestibles; prevención y el control de biopelículas en la maquinaria alimentaria; reducción y degradación de contaminantes como aminos biógenas, pesticidas y micotoxinas. Con respecto

a los alimentos funcionales, se han estudiado alimentos lácteos con bacterias inactivadas (paraprobióticos), por ejemplo, Zeng *et al.* (2016) reportaron un yogurt con los cultivos iniciadores inactivados (*Lb. bulgaricus*, *Strept. thermophilus* y *Lb. acidophilus*), el cual impidió la disfunción de la barrera epitelial. Otro ejemplo es una bebida de leche fermentada con *Lb. gasseri* CP2305 inactivo realizado por Nishida *et al.* (2017), esta bebida mejoró los síntomas relacionados con el estrés y la calidad del sueño. Siciliano *et al.* (2021) mencionaron que los posbióticos y paraprobióticos pueden ser añadidos en alimentos no lácteos. Con base en esto, Sawada *et al.* (2019) formularon una bebida deportiva con *Lb. gasseri* CP2305 inactivada térmicamente, y se reportó que su consumo prolongado (doce semanas) contribuyó a la recuperación de fatiga, alivio de ansiedad y estados de ánimo depresivos en jóvenes atletas. Barros *et al.* (2021) propusieron una bebida de jugo de uva y suero de leche con *Lb. casei* 01 inactivo, que fue efectiva en reducir la glucemia posprandial en personas saludables.

Los principales desafíos en la aplicación de posbióticos en alimentos es que no se han evaluado las interacciones que pudieran existir entre la mezcla de posbióticos y la matriz alimentaria, ya que las interacciones podrían reducir beneficios de los posbióticos, inclusive generar compuestos antagonistas. Por ejemplo, algunos metabolitos como los EPS podrían proteger a los patógenos del estrés ambiental (pH y temperatura) y mejorar su proliferación en el alimento (Moradi *et al.*, 2020). Por lo tanto, es fundamental evaluar la toxicología y la seguridad alimentaria de los posbióticos, a pesar de que estos provengan de probióticos. Hasta el momento, no existen estudios que reporten la sinergia y la actividad antagonista de los posbióticos con los componentes alimentarios (grasas, proteínas, carbohidratos, enzimas y microbiota) (Moradi *et al.*, 2020). Por otro lado, es importante estudiar las propiedades organolépticas de los alimentos con posbióticos adicionados, ya que Moradi *et al.* (2020) mencionaron que los posbióticos cultivados con caldo MRS pueden afectar negativamente al color y sabor cuando se añaden en alimentos lácteos. Otro desafío es que falta más investigación para entender los mecanismos de los beneficios a la salud que pudieran aportar los alimentos con posbióticos, ya que la mayoría de los estudios se han realizado *in vitro* y en modelos animales, pero son escasos en modelos humanos. Además, esta

evidencia podría respaldar los *health claims* en los alimentos con estos metabolitos (Cuevas-González *et al.*, 2020). También se debe de tomar en cuenta la realización y aprobación de regulaciones del uso de posbióticos en alimentos.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

En conclusión, los posbióticos son metabolitos generados por probióticos durante su ciclo de vida y liberados en la lisis celular, cuyo consumo pueden conferir un beneficio a la salud del huésped. Como se describió en esta revisión bibliográfica, se ha identificado una gran variedad de posbióticos de probióticos, los cuales según el tipo de compuesto exhiben diversas propiedades funcionales como antimicrobianas, antioxidantes, inmunes, anticancerígenas, antidiabéticas, antienviejecimiento y acciones contra la formación de biopelículas. Asimismo, la investigación en el proceso de obtención de los posbióticos es importante para una escala industrial, ya que la producción de estos compuestos implica la consideración de varios factores que van desde la elección de los probióticos, los medios y las condiciones de cultivo, los tratamientos de inactivación, los métodos de extracción y concentración, así como su análisis químico para su respectiva identificación. La aplicación de posbióticos en los alimentos representa un área de oportunidad muy prometedora para la investigación, ya que estos compuestos presentan ventajas tecnológicas con respecto a los probióticos. Además, hasta el momento son pocos los estudios que incorporan estos metabolitos en alimentos y evalúan los beneficios que realmente pueden aportar.

AGRADECIMIENTOS

Victor Enrique Vera Santander agradece a la Universidad de las Américas Puebla y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)— por el apoyo recibido para el financiamiento de sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- Abanoz, H. S. y Kunduhoglu, B. (2018). Antimicrobial Activity of a Bacteriocin Produced by *Enterococcus faecalis* KT11 against Some Pathogens and Antibiotic-Resistant Bacteria. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 38(5), 1064-1079. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2018.e40>
- Aguilar, L. M., Geraldi, M. V., Betim Cazarin, C. B. y Maróstica Junior, M. R. (2019). Functional Food Consumption and Its Physiological Effects. In *Bioactive Compounds* (pp. 205-225). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814774-0.00011-6>
- Aguilar-Toalá, J. E., García-Varela, R., García, H. S., Mata-Haro, V., González-Córdova, A. F., Vallejo-Cordoba, B. y Hernández-Mendoza, A. (2018). Postbiotics: An evolving term within the functional foods field. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.009>
- Aguilar-Toalá, J. E., Hall, F. G., Urbizo-Reyes, U. C., García, H. S., Vallejo-Cordoba, B., González-Córdova, A. F., Hernández-Mendoza, A. y Liceaga, A. M. (2020). In Silico Prediction and *In Vitro* Assessment of Multifunctional Properties of Postbiotics Obtained From Two Probiotic Bacteria. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 12(2), 608-622. <https://doi.org/10.1007/s12602-019-09568-7>
- Ali, A. y Rahut, D. B. (2019). Healthy Foods as Proxy for Functional Foods: Consumers' Awareness, Perception, and Demand for Natural Functional Foods in Pakistan. *International Journal of Food Science*, 2019, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2019/6390650>
- Barros, C. P., Grom, L. C., Guimarães, J. T., Balthazar, C. F., Rocha, R. S., Silva, R., Almada, C. N., Pimentel, T. C., Venâncio, E. L., Collopy Junior, I., Maciel, P. M. C., Freitas, M. Q., Esmerino, E. A., Silva, M. C., Duarte, M. C. K. H., Sant'Ana, A. S. y Cruz, A. G. (2021). Paraprobiotic obtained by ohmic heating added in whey-grape juice drink is effective to control postprandial glycemia in healthy adults. *Food Research International*, 140, 109905. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109905>
- Ben Othman, M. y Sakamoto, K. (2020). Effect of inactivated *Bifidobacterium longum* intake on obese diabetes model mice (TSOD). *Food Research International*, 129, 108792. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108792>
- Breyner, N. M., Michon, C., de Sousa, C. S., Vilas Boas, P. B., Chain, F., Azevedo, V. A., Langella, P. y Chatel, J. M. (2017). Microbial Anti-Inflammatory Molecule (MAM) from *Faecalibacterium prausnitzii* Shows a Protective Effect on DNBS and DSS-Induced Colitis Model in Mice through Inhibition of NF- κ B Pathway. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00114>
- Brodmann, T., Endo, A., Gueimonde, M., Vinderola, G., Kneifel, W., De Vos, W. M., Salminen, S. y Gómez-Gallego, C. (2017). Safety of Novel Microbes for Human Consumption: Practical Examples of Assessment in the European Union. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1725. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01725>
- Cani, P. D. y De Vos, W. M. (2017). Next-Generation Beneficial Microbes: The Case of Akkermansia muciniphila. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1765. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01765>
- Collado, M. C., Vinderola, G. y Salminen, S. (2019). Postbiotics: Facts and open questions. A position paper on the need for a consensus definition. *Beneficial Microbes*, 10(7), 711-719. <https://doi.org/10.3920/BM2019.0015>
- Contesini, F. J., De Melo, R. R. y Sato, H. H. (2018). An overview of *Bacillus* proteases: From production to application. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(3), 321-334. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1354354>
- Cordoba, A. y Hotel, P. (2001). *Health and Nutritional Properties of Probiotics in Food including Powder Milk with Live Lactic Acid Bacteria*. 34.
- Cuevas-González, P. F., Liceaga, A. M. y Aguilar-Toalá, J. E. (2020). Postbiotics and paraprobiotics: From concepts to applications. *Food Research International*, 136, 109502. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109502>
- De Almada, C. N., Almada, C. N., Martínez, R. C. R. y Sant'Ana, A. S. (2016). Paraprobiotics: Evidences on their ability to modify biological responses, inactivation methods and perspectives on their application in foods. *Trends in Food Science & Technology*, 58, 96-114. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.011>
- De Man, J. C., Rogosa, M. y Sharpe, M. E. (1960). A medium for the cultivation of lactobacilli. *Journal of Applied Bacteriology*, 23(1), 130-135. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1960.tb00188.x>
- De Vuyst, L. y Leroy, F. (2007). Bacteriocins from Lactic Acid Bacteria: Production, Purification, and Food Applications. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 13(4), 194-199. <https://doi.org/10.1159/000104752>
- Deptula, P., Chamlagain, B., Edelmann, M., Sangsuwan, P., Nyman, T. A., Savijoki, K., Piironen, V. y Varmanen, P. (2017). Food-Like Growth Conditions Support Production of Active Vitamin B12 by *Propionibacterium freudenreichii* 2067 without DMBI, the Lower Ligand Base, or Cobalt Supplementation. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00368>
- Dì, W., Zhang, L., Wang, S., Yi, H., Han, X., Fan, R. y Zhang, Y. (2017). Physicochemical characterization and antitumor activity of exopolysaccharides produced by *Lactobacillus casei* SB27 from yak milk. *Carbohydrate Polymers*, 171, 307-315. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.018>
- Díaz-Vela, J., Mayorga-Reyes, L., Totosaus S., A. y Pérez-Chabela, M. de L. (2012). Parámetros cinéticos y perfil de ácidos grasos de cadena corta de bacterias ácido lácticas termotolerantes con diferentes fuentes de carbono. *Vita*, 19(3), 253-260.
- Dinić, M., Lukić, J., Djokić, J., Milenković, M., Strahinić, I., Golić, N. y Begović, J. (2017). *Lactobacillus fermentum* Postbiotic-induced Autophagy as Potential

- Approach for Treatment of Acetaminophen Hepatotoxicity. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00594>
- Dunand, E., Burns, P., Binetti, A., Bergamini, C., Peralta, G. H., Forzani, L., Reinheimer, J. y Vinderola, G. (2019). Postbiotics produced at laboratory and industrial level as potential functional food ingredients with the capacity to protect mice against *Salmonella* infection. *Journal of Applied Microbiology*, 127(1), 219-229. <https://doi.org/10.1111/jam.14276>
- Fernandes, S. S., Coelho, M. S. y Salas-Mellado, M. de las M. (2019). Bioactive Compounds as Ingredients of Functional Foods. In *Bioactive Compounds* (pp. 129-142). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814774-0.00007-4>
- Fracchia, L., J. Banat, J., Cavallo, M., Ceresa, C. y M. Banat, I. (2015). Potential therapeutic applications of microbial surface-active compounds. *AIMS Bioengineering*, 2(3), 144-162. <https://doi.org/10.3934/bioeng.2015.3.144>
- Garnier, L., Mounier, J., Lê, S., Pawtowski, A., Pinon, N., Camier, B., Chatel, M., Garric, G., Thierry, A., Coton, E. y Valence, F. (2019). Development of antifungal ingredients for dairy products: From *in vitro* screening to pilot scale application. *Food Microbiology*, 81, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.11.003>
- Gill, P. A., Bogatyrev, A., Zelm, M. C., Gibson, P. R. y Muir, J. G. (2021). Delivery of Acetate to the Peripheral Blood after Consumption of Foods High in Short-Chain Fatty Acids. *Molecular Nutrition & Food Research*, 65(4), 2000953. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202000953>
- Gill, P. A., Van Zelm, M. C., Muir, J. G. y Gibson, P. R. (2018). Review article: Short chain fatty acids as potential therapeutic agents in human gastrointestinal and inflammatory disorders. *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 48(1), 15-34. <https://doi.org/10.1111/apt.14689>
- Gómez-Sala, B., Herranz, C., Díaz-Freitas, B., Hernández, P. E., Sala, A. y Cintas, L. M. (2016). Strategies to increase the hygienic and economic value of fresh fish: Biopreservation using lactic acid bacteria of marine origin. *International Journal of Food Microbiology*, 223, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.02.005>
- Guo, Y., Pan, D., Li, H., Sun, Y., Zeng, X. y Yan, B. (2013). Antioxidant and immunomodulatory activity of selenium exopolysaccharide produced by *Lactococcus lactis* subsp. *Lactis*. *Food Chemistry*, 138(1), 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.029>
- Han, X., Holtzman, D. M. y McKeel, D. W. (2001). Plasmalogen deficiency in early Alzheimer's disease subjects and in animal models: Molecular characterization using electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Neurochemistry*, 77(4), 1168-1180. <https://doi.org/10.1046/j.1471-4159.2001.00332.x>
- Hasan, F. B., Reza, M., Masud, H. A. A., Uddin, M. K. y Uddin, M. S. (2019). Preliminary characterization and inhibitory activity of bacteriocin like substances from *Lactobacillus casei* against multi-drug resistant bacteria. *Bangladesh Journal of Microbiology*, 36(1), 1-6. <https://doi.org/10.3329/bjbm.v36i1.44259>
- Heredia-Castro, P. Y., Hernández-Mendoza, A., González-Córdova, A. F. y Vallejo-Cordoba, B. (2017). Bacteriocinas de bacterias ácido lácticas: mecanismos de acción y actividad antimicrobiana contra patógenos en quesos. *Inter-ciencia*, 42(6), 340-346. <https://www.redalyc.org/journal/339/33951621002/html/>
- Hernández-Granados, M. J. y Franco-Robles, E. (2020). Postbiotics in human health: Possible new functional ingredients? *Food Research International*, 137, 109660. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109660>
- Hols, P., Ledesma-García, L., Gabant, P. y Mignolet, J. (2019). Mobilization of Microbiota Commensals and Their Bacteriocins for Therapeutics. *Trends in Microbiology*, 27(8), 690-702. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2019.03.007>
- Holzappel, W. H. y Wood, B. J. B. (2014). Introduction to the LAB. In W. H. Holzappel y B. J. B. Wood (Eds.), *Lactic Acid Bacteria* (pp. 1-12). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118655252.ch1>
- Homayouni-Rad, A., Aghebati Maleki, L., Samadi Kafil, H. y Abbasi, A. (2021). Postbiotics: A novel strategy in food allergy treatment. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(3), 492-499. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1738333>
- Hossain, Md. S., Tajima, A., Kotoura, S. y Katafuchi, T. (2018). Oral ingestion of plasmalogens can attenuate the LPS-induced memory loss and microglial activation. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 496(4), 1033-1039. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2018.01.078>
- Johnson, C. N., Kogut, M. H., Genovese, K., He, H., Kazemi, S. y Arsenault, R. J. (2019). Administration of a Postbiotic Causes Immunomodulatory Responses in Broiler Gut and Reduces Disease Pathogenesis Following Challenge. *Microorganisms*, 7(8), 268. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7080268>
- Kamiya, T., Wang, L., Forsythe, P., Goettsche, G., Mao, Y., Wang, Y., Tougas, G. y Bienenstock, J. (2006). Inhibitory effects of *Lactobacillus reuteri* on visceral pain induced by colorectal distension in Sprague-Dawley rats. *Gut*, 55(2), 191. <https://doi.org/10.1136/gut.2005.070987>
- Kim, K. W., Kang, S.-S., Woo, S. J., Park, O. J., Ahn, K. B., Song, K. D., Lee, H.-K., Yun, C.-H., y Han, S. H. (2017). Lipoteichoic Acid of Probiotic *Lactobacillus plantarum* Attenuates Poly I:C-Induced IL-8 Production in Porcine Intestinal Epithelial Cells. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1827. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01827>
- Klemashevich, C., Wu, C., Howsmon, D., Alaniz, R. C., Lee, K. y Jayaraman, A. (2014). Rational identification of diet-derived postbiotics for improving intestinal microbiota function. *Current Opinion in Biotechnology*, 26, 85-90. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.10.006>

- Lebeer, S., Claes, I. J., Verhoeven, T. L. A., Vanderleyden, J. y De Keersmaecker, S. C. J. (2011). Exopolysaccharides of *Lactobacillus rhamnosus* GG form a protective shield against innate immune factors in the intestine: EPS as adaptation factor of *L. rhamnosus* GG. *Microbial Biotechnology*, 4(3), 368-374. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2010.00199.x>
- Lebeer, S., Claes, I., Tytgat, H. L. P., Verhoeven, T. L. A., Marien, E., von Ossowski, I., Reunanen, J., Palva, A., De Vos, W. M., De Keersmaecker, S. C. J. y Vanderleyden, J. (2012). Functional Analysis of *Lactobacillus rhamnosus* GG Pili in Relation to Adhesion and Immunomodulatory Interactions with Intestinal Epithelial Cells. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(1), 185-193. <https://doi.org/10.1128/AEM.06192-11>
- LeBlanc, J. G., Chain, F., Martín, R., Bermúdez-Humarán, L. G., Courau, S. y Langella, P. (2017). Beneficial effects on host energy metabolism of short-chain fatty acids and vitamins produced by commensal and probiotic bacteria. *Microbial Cell Factories*, 16(1), 79. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0691-z>
- Lopez, M., Li, N., Kataria, J., Russell, M. y Neu, J. (2008). Live and Ultraviolet-Inactivated *Lactobacillus Rhamnosus* GG Decrease Flagellin-Induced Interleukin-8 Production in Caco-2 Cells. *The Journal of Nutrition*, 138(11), 2264-2268. <https://doi.org/10.3945/jn.108.093658>
- Luong, T. M., Ponamareva, O. N., Nechaeva, I. A., Petrikov, K. V., Deegan, Ya. A., Surin, A. K., Linklater, D. y Filonov, A. E. (2018). Characterization of biosurfactants produced by the oil-degrading bacterium *Rhodococcus erythropolis* S67 at low temperature. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 34(2), 20. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2401-8>
- Martin, R., Miquel, S., Benevides, L., Bridonneau, C., Robert, V., Hudault, S., Chain, F., Berteau, O., Azevedo, V., Chatel, J. M., Sokol, H., Bermúdez-Humarán, L. G., Thomas, M. y Langella, P. (2017). Functional Characterization of Novel *Faecalibacterium prausnitzii* Strains Isolated from Healthy Volunteers: A Step Forward in the Use of *F. prausnitzii* as a Next-Generation Probiotic. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1226. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01226>
- Meimandipour, A., Hair-Bejo, M., Shuhaimi, M., Azhar, K., Soleimani, A. F., Rasti, B. y Yazid, A. M. (2010). Gastrointestinal tract morphological alteration by unpleasant physical treatment and modulating role of *Lactobacillus* in broilers. *British Poultry Science*, 51(1), 52-59. <https://doi.org/10.1080/00071660903394455>
- Merghni, A., Dalle, I., Noumi, E., Kadmi, Y., Hentati, H., Tobji, S., Ben Amor, A. y Mastouri, M. (2017). Antioxidant and antiproliferative potential of biosurfactants isolated from *Lactobacillus casei* and their anti-biofilm effect in oral *Staphylococcus aureus* strains. *Microbial Pathogenesis*, 104, 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.01.017>
- Mitrofanova, O., Mardanova, A., Evtugyn, V., Bogomolnaya, L. y Sharipova, M. (2017). Effects of *Bacillus* Serine Proteases on the Bacterial Biofilms. *BioMed Research International*, 2017, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2017/8525912>
- Moradi, M., Kousheh, S. A., Almasi, H., Alizadeh, A., Guimarães, J. T., Yilmaz, N. y Lotfi, A. (2020). Postbiotics produced by lactic acid bacteria: The next frontier in food safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 3390-3415. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12613>
- Moradi, M., Molaei, R. y Guimarães, J. T. (2021). A review on preparation and chemical analysis of postbiotics from lactic acid bacteria. *Enzyme and Microbial Technology*, 143, 109722. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2020.109722>
- Morais, I. M. C., Cordeiro, A. L., Teixeira, G. S., Domingues, V. S., Nardi, R. M. D., Monteiro, A. S., Alves, R. J., Siqueira, E. P. y Santos, V. L. (2017). Biological and physicochemical properties of biosurfactants produced by *Lactobacillus jensenii* P6A and *Lactobacillus gasseri* P65. *Microbial Cell Factories*, 16(1), 155. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0769-7>
- Nataraj, B. H., Ali, S. A., Behare, P. V. y Yadav, H. (2020). Postbiotics-parabiotics: The new horizons in microbial biotherapy and functional foods. *Microbial Cell Factories*, 19(1), 168. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01426-w>
- Nishida, K., Sawada, D., Kawai, T., Kuwano, Y., Fujiwara, S. y Rokutan, K. (2017). Para-psychobiotic *Lactobacillus gasseri* CP 2305 ameliorates stress-related symptoms and sleep quality. *Journal of Applied Microbiology*, 123(6), 1561-1570. <https://doi.org/10.1111/jam.13594>
- Oberg, T. S., Ward, R. E., Steele, J. L. y Broadbent, J. R. (2012). Identification of Plasmalogens in the Cytoplasmic Membrane of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(3), 880-884. <https://doi.org/10.1128/AEM.06968-11>
- Preciado, G. M., Escalante-Minakata, P., Castro, J. A. O., Junquera, V. I., Chávez, J. A. M., González, C. N. A. y Herrera, R. R. (2013). *Bacteriocinas: Características y aplicación en alimentos*. 8.
- Řezanka, T., Křesinová, Z., Kolouchová, I. y Sigler, K. (2012). Lipidomic analysis of bacterial plasmalogens. *Folia Microbiologica*, 57(5), 463-472. <https://doi.org/10.1007/s12223-012-0178-6>
- Salminen, S., Collado, M. C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E. M. M., Sanders, M. E., Shamir, R., Swann, J. R., Szajewska, H. y Vinderola, G. (2021). The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18(9), 649-667. <https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6>
- Satpute, S. K., Kulkarni, G. R., Banpurkar, A. G., Banat, I. M., Mone, N. S., Patil, R. H., y Cameotra, S. S. (2016). Biosurfactant/s from *Lactobacilli* species: Properties, challenges and potential biomedical applications. *Jour-*

- Journal of Basic Microbiology*, 56(11), 1140-1158. <https://doi.org/10.1002/jobm.201600143>
- Sawada, D., Kuwano, Y., Tanaka, H., Hara, S., Uchiyama, Y., Sugawara, T., Fujiwara, S., Rokutan, K. y Nishida, K. (2019). Daily intake of *Lactobacillus gasseri* CP2305 relieves fatigue and stress-related symptoms in male university Eki-den runners: A double-blind, randomized, and placebo-controlled clinical trial. *Journal of Functional Foods*, 57, 465-476. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.04.022>
- Sawada, D., Sugawara, T., Ishida, Y., Aihara, K., Aoki, Y., Takehara, I., Takano, K. y Fujiwara, S. (2016). Effect of continuous ingestion of a beverage prepared with *Lactobacillus gasseri* CP2305 inactivated by heat treatment on the regulation of intestinal function. *Food Research International*, 79, 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.11.032>
- Shin, H. S., Park, S. Y., Lee, D. K., Kim, S. A., An, H. M., Kim, J. R., Kim, M. J., Cha, M. G., Lee, S. W., Kim, K. J., Lee, K. O. y Ha, N. J. (2010). Hypocholesterolemic effect of sonication-killed *Bifidobacterium longum* isolated from healthy adult Koreans in high cholesterol fed rats. *Archives of Pharmacal Research*, 33(9), 1425-1431. <https://doi.org/10.1007/s12272-010-0917-7>
- Siciliano, R. A., Reale, A., Mazzeo, M. F., Morandi, S., Silveti, T. y Brasca, M. (2021). Paraprobiotics: A New Perspective for Functional Foods and Nutraceuticals. *Nutrients*, 13(4), 1225. <https://doi.org/10.3390/nu13041225>
- Sivieri, K., Morales, M. L. V., Adorno, M. A. T., Sakamoto, I. K., Saad, S. M. I. y Rossi, E. A. (2013). *Lactobacillus acidophilus* CRL 1014 improved «gut health» in the SHIME® reactor. *BMC Gastroenterology*, 13(1), 100. <https://doi.org/10.1186/1471-230X-13-100>
- Thakur, K., Lule, V., Kumar, N., Mandal, S., Anand, S., Kumari, V. y Tomar, S. (2016). Riboflavin Producing Probiotic *Lactobacilli* as a Biotechnological Strategy to Obtain Riboflavin-enriched Fermented Foods. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 10, 161-166.
- Tiptiri-Kourpeti, A., Spyridopoulou, K., Santarmaki, V., Aindelis, G., Tompoulidou, E., Lamprianidou, E. E., Saxami, G., Ypsilantis, P., Lampri, E. S., Simopoulos, C., Kotsianidis, I., Galanis, A., Kourkoutas, Y., Dimitrellou, D. y Chlichlia, K. (2016). *Lactobacillus casei* Exerts Anti-Proliferative Effects Accompanied by Apoptotic Cell Death and Up-Regulation of TRAIL in Colon Carcinoma Cells. *Plos One*, 11(2), e0147960. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147960>
- Tsilingiri, K. y Rescigno, M. (2013). Postbiotics: What else? *Beneficial Microbes*, 4(1), 101-107. <https://doi.org/10.3920/BM2012.0046>
- Van der Es, D., Hogendorf, W. F. J., Overkleeft, H. S., Van der Marel, G. A. y Codée, J. D. C. (2017). Teichoic acids: Synthesis and applications. *Chemical Society Reviews*, 46(5), 1464-1482. <https://doi.org/10.1039/C6CS00270F>
- Wallner, S. y Schmitz, G. (2011). Plasmalogens the neglected regulatory and scavenging lipid species. *Chemistry and Physics of Lipids*, 164(6), 573-589. <https://doi.org/10.1016/j.chemphyslip.2011.06.008>
- Wang, K., Niu, M., Song, D., Song, X., Zhao, J., Wu, Y., Lu, B. y Niu, G. (2020). Preparation, partial characterization and biological activity of exopolysaccharides produced from *Lactobacillus fermentum* S1. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 129(2), 206-214. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.07.009>
- Wang, S., Ahmadi, S., Nagpal, R., Jain, S., Mishra, S. P., Kavanagh, K., Zhu, X., Wang, Z., McClain, D. A., Kritchevsky, S. B., Kitzman, D. W. y Yadav, H. (2020). Lipoteichoic acid from the cell wall of a heat killed *Lactobacillus paracasei* D3-5 ameliorates aging-related leaky gut, inflammation and improves physical and cognitive functions: From *C. elegans* to mice. *GeroScience*, 42(1), 333-352. <https://doi.org/10.1007/s11357-019-00137-4>
- Wegh, A. M., Geerlings, S. Y., Knol, J., Roeselers, G. y Belzer, C. (2019). Postbiotics and Their Potential Applications in Early Life Nutrition and Beyond. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19), 4673. <https://doi.org/10.3390/ijms20194673>
- Welman, A. D. y Maddox, I. S. (2003). Exopolysaccharides from lactic acid bacteria: Perspectives and challenges. *Trends in Biotechnology*, 21(6), 269-274.
- Williams, N. T. (2010). Probiotics. *American Journal of Health-System Pharmacy*, 67(6), 449-458. <https://doi.org/10.2146/ajhp090168>
- Xu, R., Aruhan, Xiu, L., Sheng, S., Liang, Y., Zhang, H., Liu, Y., Tong, H., Du, R. y Wang, X. (2019). Exopolysaccharides from *Lactobacillus buchneri* TCPO16 Attenuate LPS- and d-GaIN-Induced Liver Injury by Modulating the Gut Microbiota. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(42), 11627-11637. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04323>
- Zeng, J., Jiang, J., Zhu, W. y Chu, Y. (2016). Heat-killed yogurt-containing lactic acid bacteria prevent cytokine-induced barrier disruption in human intestinal Caco-2 cells. *Annals of Microbiology*, 66(1), 171-178. <https://doi.org/10.1007/s13213-015-1093-2>
- Zhou, Y., Cui, Y. y Qu, X. (2019). Exopolysaccharides of lactic acid bacteria: Structure, bioactivity and associations: A review. *Carbohydrate Polymers*, 207, 317-332. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.093>
- Żółkiewicz, J., Marzec, A., Ruszczynski, M. y Feleszko, W. (2020). Postbiotics: A Step Beyond Pre- and Probiotics. *Nutrients*, 12(8), 2189. <https://doi.org/10.3390/nu12082189>
- Zucko, J., Starcevic, A., Diminic, J., Oros, D., Mortazavian, A. M. y Putnik, P. (2020). Probiotic - friend or foe? *Current Opinion in Food Science*, 32, 45-49. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.01.007>

Importancia del uso de insectos para la alimentación humana y su relevancia en la industria y la seguridad alimentaria

S. Cortazar-Moya* y J. I. Morales-Camacho

*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos
Correos electrónicos: sheila.cortazarma@udlap.mx · jocksan.morales@udlap.mx



RESUMEN

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO/ONU) ha informado que para el año 2050 la población mundial aumentará a más de 9.1 billones de personas. Este hecho implicará una mayor demanda de alimentos, lo cual convertirá la seguridad alimentaria en un desafío gigantesco. Los alimentos ricos en proteínas de alto valor biológico deben ser una prioridad debido a su importancia para el adecuado desarrollo físico y mental de las personas. En este sentido, los insectos como fuente de proteínas están siendo estudiados en todo el mundo. Las principales ventajas de promover la entomofagia como una alternativa para la alimentación humana son su creciente utilización industrial, la nula necesidad de ser alimentados con cereales, y su baja exigencia de tiempo y espacio para su crianza, lo cual hace que sea una opción eficiente y una fuente sustentable de proteína. En la actualidad, los insectos comestibles son comunes y populares en los países en desarrollo, mientras que en los países occidentales no tienen la misma aceptabilidad y su consumo sigue siendo muy bajo. Esta revisión pretende mostrar el origen histórico de la entomofagia en México y el mundo, sus beneficios nutrimentales y el papel tan importante que puede jugar dentro de la industria y la seguridad alimentaria.

Palabras clave: insectos, entomofagia, nutrición, proteína.

ABSTRACT

The Food and Agriculture Organization (FAO) has reported that by 2050 the world population will increase to more than 9.1 billion people. This fact will imply a greater demand for food, turning food security into a gigantic challenge. Foods rich in protein of high biological value should be a priority due to their importance for the proper physical and mental development of people. In this sense, insects as a source of protein are being studied all over the world. The main advantages of promoting entomophagy as an alternative for human consumption are their increasing industrial use, the fact that they don't need to be fed with cereals, and their low time and space requirements for rearing, which makes them an efficient and sustainable source of protein. Nowadays, edible insects, although common and popular in developing countries, do not have the same acceptability in western countries, where the adoption of their consumption is still very low. Thus, this review aims to show the historical origin of entomophagy in Mexico and the world, its nutritional benefits and the important role it can play within food safety and the food industry.

Keywords: insects, entomophagy, nutrition, protein.

INTRODUCCIÓN

El consumo de insectos —también conocido como entomofagia— es parte de la cultura popular en diversas partes del mundo. Los insectos y sus productos son comestibles en cualquiera de sus distintas fases de desarrollo, como huevos, larvas, ninfas, pupas o adultos y pueden ser preparados de distintas maneras: fritos, en almíbar, con chocolate, al mojo de ajo, etcétera (Wilson-Bessa *et al.*, 2020).

Los insectos son un recurso alimenticio natural para muchos grupos étnicos en Asia, África y América del Sur. En México los principales grupos étnicos que los consumen como parte de su dieta son los mixtecos, nahuas, tlapanecos, huastecos, mazahuas, otomíes, huicholes, popolocas, purépechas, tzotziles, entre otros. En estas regiones la entomofagia puede ser sostenible y conlleva beneficios económicos, nutrimentales y ecológicos (Ramos-Elorduy, 2009). En dichas zonas, que en total abarcan 130 países, hasta el momento se ha descrito un consumo de un total de 1,900 especies de insectos. A diferencia de esas poblaciones, en los países desarrollados el consumo de insectos es inusual y muy poco aceptado debido principalmente a la neofobia asociada con su aspecto (Vadivelu-Amarender, 2020).

Gracias a diversas investigaciones ahora se sabe que a futuro los insectos pueden ser una alternativa viable como fuente de proteína de alto valor biológico, la cual es necesaria para evitar desnutrición y deficiencia en el desarrollo del ser humano. Hoy en día se tiene evidencia de que las especies del orden ortóptera (saltamontes, grillos y langostas) y lepidóptera (orugas) son ricas en proteína (tienen hasta un 77 % en base seca), incluso representan una mejor fuente de este macronutriente, en comparación con la carne de res, cerdo, pollo y cordero (Van Huis, 2013).

Por las características nutrimentales antes mencionadas, los insectos pueden ser considerados una alternativa para ayudar con la crisis alimentaria que se acerca. De acuerdo con información publicada por la FAO, la capacidad para alimentar a la población mundial está en peligro, debido principalmente a la creciente demanda de alimentos sobre los recursos naturales y los efectos del cambio climático (FAO, 2013).

Los aspectos socioeconómicos, los actuales problemas ambientales y las características nutrimentales de los insectos los convierten en una opción viable para resolver la seguridad alimentaria mundial. Por ello, esta revisión explorará los orígenes de la entomofagia en México y el mundo, así como los aspectos nutrimentales y el papel que juegan los insectos en la industria y la seguridad alimentaria.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. La entomofagia

Los insectos son la especie más abundante y con mayor diversidad en el mundo. Desempeñan roles de importancia en los ecosistemas, como remoción y aireación del suelo, control de plagas, polinización, y son el alimento de muchas otras especies de la vida silvestre. Además, se sabe que han sido una fuente primaria de alimentación para los humanos desde la antigüedad, principalmente en épocas donde la caza y la recolección aún no eran posibles por la falta de herramientas, por lo que una porción de la raza humana ha sobrevivido y evolucionado comiendo insectos (Bernard y Womeni, 2017; Hazarika, *et al.*, 2020).

El consumo de insectos por parte de la humanidad se ha podido evidenciar mediante el análisis de coprolitos —heces fosilizadas de pueblos antiguos—, que contenían diversas especies, incluyendo hormigas, larvas de escarabajos, piojos, garrapatas y ácaros (Govorushko, 2019). De acuerdo con la FAO, se tiene registro de más de 1,900 especies de insectos comestibles en el mundo y la gran mayoría se encuentran en países tropicales (Van Huis *et al.*, 2013; Batat y Peter, 2020).

Bodenheimer (1951) rastreó el origen de la entomofagia y la dividió en tres etapas: la Antigüedad, la Edad Media y la entomofagia moderna. En la Antigüedad, el consumo de ciertos insectos —como los grillos— era considerado un manjar y formaban parte de banquetes reales en Roma, Oriente Medio y Grecia. Hacia la Edad Media, se les dio un uso medicinal, principalmente en China durante la dinastía Ming. Finalmente, la entomofagia moderna se refiere al redescubrimiento de esta práctica en la cul-

tura occidental a partir del siglo XIX, por parte de exploradores en regiones tropicales de África del Norte y Central, y en tribus indígenas de América del Sur (Batat y Peter, 2020).

En la época moderna, los insectos parecen ser un alimento nuevo y aún falta mucha información acerca de su inocuidad y valor nutricional, debido a que son una especie con una variedad muy amplia y diversa (Rumpold y Schlüter, 2013).

1.1. Entomofagia en el mundo

En algunas partes del mundo, como África, Asia y América Latina, los insectos desempeñan un papel importante en la nutrición de la población. Hay 524 especies consumidas en África, 349 en Asia, 679 en América, 41 en Europa y 152 en Australia (Kelemu *et al.*, 2015; Raheem *et al.*, 2019).

La especie de insectos de mayor consumo a nivel mundial es el escarabajo (coleóptera) con 31 %. Este orden posee aproximadamente el 40 % de todas las especies de insectos conocidas. En África subsahariana los insectos comestibles más populares son las orugas (lepidóptera), en América Latina las abejas, avispas y hormigas (himenópteros) seguidos por los saltamontes, langostas y grillos (ortóptera) (Van Huis *et al.*, 2013). Los lepidópteros se consumen como orugas y los himenópteros se recolectan y comen en sus estadios larvarios o pupales (Cerritos, 2009; Kelemu *et al.*, 2015).

Así como en África, los insectos forman parte de la alimentación en Asia, pero en este caso, además de su recolección en la naturaleza, se están llevando a cabo acciones de semidomesticación para su consumo, que es cada vez más común en esa región. En mayor medida, se crían saltamontes (*Locust migratoria*), dentro de los cuales encontramos a los grillos comunes (*Gryllus brimaculatus*) y grillos domésticos (*Acheta domesticus*) (Raheem *et al.*, 2018).

En China se han estudiado y desarrollado bebidas con alto contenido de proteínas y aminoácidos a partir del polvo de insectos comestibles (Feng *et al.*, 2018). En Japón son consumidos en las zonas montañosas, donde se recolectan saltamontes en los arrozales y se elaboran productos alimenticios a base de larvas de avispas, los cuales son manjares populares; también se comen pupas y hembras adultas de *Bombyx mori*, y se utiliza como me-

dicina tradicional a las larvas de mosca dobson (*Prothermes grandis*) (Nonaka, 2009; Raheem *et al.*, 2018). Otro país del continente asiático que consume insectos es Tailandia, pues se tienen registradas 194 especies de insectos comestibles. Entre ellas, escarabajos (61 especies); lepidópteros (47 especies); grillos y saltamontes (22 especies); abejas, avispas y hormigas (16 especies); cigarras, insectos y chinches (once especies); insectos chupadores (once especies); y libélulas (cuatro especies) (Raheem *et al.*, 2019). Aproximadamente más de la mitad de la población de este país habita en zonas rurales del norte y noreste, donde se consumen los insectos como fuente de proteína debido a las limitaciones socioculturales y económicas para acceder a la carne de cerdo, res, pollo, leche, etcétera (Yhoung-Aree 2010; Raheem *et al.*, 2018).

1.2. Entomofagia en México

México es uno de los países que ha conservado las costumbres precolombinas de consumo de insectos y arácnidos. Su consumo se remonta a los aztecas, quienes se alimentaban con 91 géneros de insectos (Estolano-Macedo *et al.*, 2017; Molina-Nery *et al.*, 2017). Actualmente se han reportado 525 especies comestibles en México, 83 % pertenecientes a insectos terrestres y 17 % a ecosistemas acuáticos. De este total, el 55.79 % se consume en estado inmaduro (huevos, larvas, pupas, ninfas) y el 44.21 % en estado adulto, aunque algunas especies pueden ser ingeridas en cualquier estado de desarrollo (Ramos-Elorduy, 2009; Yen, 2015).

Los estados en que se comen en mayor cantidad son Oaxaca, Guerrero, Morelos, Puebla, Hidalgo, Tlaxcala y Querétaro. En Oaxaca se consumen los saltamontes, la chinche de agua llamada *axayacatl*, las pupas de mosca de agua *poxi*, los huevos de chinche *ahuahutle* y las larvas de mosca (Figuroa-Rodríguez *et al.*, 2002; Ramos-Elorduy, Pino-Moreno y Concoci, 2006; Ramos-Elorduy *et al.*, 2007; Pino-Moreno *et al.*, 2016). Del mismo modo, los huevos de hormiga (comúnmente conocidos como escamoles) se venden en grandes cantidades en Hidalgo y Estado de México (Ramos-Elorduy *et al.*, 1997; Ramos-Elorduy y Pino-Moreno, 2001).

Los gusanos del magüey rojo (*Comadia redtembacheri*) son uno de los insectos comestibles más buscados en áreas rurales, mercados, tianguis y restaurantes de Oaxaca; incluso se utilizan

durante la destilación del mezcal que es exportado a Estados Unidos. Además, la grana cochinilla (*Dactylopius coccus*) es apreciada como una fuente de ácido carmínico, utilizado en la industria farmacéutica y alimenticia, en dulces, refrescos y productos lácteos (Ramos-Elorduy *et al.*, 1997).

En Morelos se comercializan en mercados y tianguis un total de ocho especies de insectos, ortóptera (dos especies), hemiptera-heteróptera (cuatro especies) y lepidóptera (dos especies) (Pino-Moreno y Reyes-Huerta, 2020).

Los adultos mayores prefieren los saltamontes, ya que consideran su sabor más agradable. En las comunidades rurales el costo de un kilo de saltamontes va desde 240 pesos mexicanos, si bien en localidades semiurbanas el precio por kilogramo puede alcanzar hasta 300 pesos, y en localidades urbanas el costo asciende a 417 pesos; también se pueden comercializar en envases o porciones de diversos tamaños, como pequeñas ollas de barro o en latas de atún o sardina (Hernández *et al.*, 2020; Pino-Moreno y Reyes-Huerta, 2020).

2. Contenido nutrimental de los insectos

Debido a la gran cantidad de especies de insectos que existen, el valor nutrimental de cada uno es muy diverso, incluso en aquellos que pertenecen a un mismo orden. Este valor nutrimental dependerá de factores como el origen, etapa de vida, alimentación, entre otros. Dentro de los componentes nutrimentales en insectos se pueden encontrar concentraciones elevadas de proteína, la cual ocupa el mayor porcentaje dentro de su perfil de nutrientes, aunque también tienen cantidades importantes de lípidos, vitaminas y minerales. Los que pueden tener más cantidad de proteína son los pertenecientes a la orden ortóptera (saltamontes, grillos y langostas) con hasta 77 g/100 g de materia seca; los más ricos en contenido de lípidos son las mariposas y polillas de la orden lepidóptera; y finalmente el contenido de hidratos de carbono puede alcanzar cantidades de hasta 94 g/100 g en insectos como las abejas, avispas y hormigas. Esta información permite a la industria alimentaria seleccionar los insectos correctos para diferentes fines, por ejemplo, utilizar aquellos con mayor contenido de proteína como fuente de biopéptidos con posibles beneficios sobre la salud de las personas, o a los insectos con una mayor cantidad de lípidos para

suplementos energéticos o para enriquecer productos alimenticios (tabla I) (Rumpold y Schlüter, 2015; Soares de Castro, 2018; Lamsal *et al.*, 2018).

2.1. Macromoléculas: proteínas, lípidos e hidratos de carbono

Los aminoácidos son los bloques esenciales que forman las proteínas, y estas son uno de los tres macronutrientes de vital importancia debido a que un aporte suficiente garantiza un adecuado crecimiento y desarrollo del cuerpo (Vadivelu-Amarendar *et al.*, 2020).

En los insectos comestibles entre el 30 y 77 % de materia seca corresponde a proteína. La calidad de esta proteína puede ser medida en función de su digestibilidad y de su composición de aminoácidos. Podemos encontrar del 46 al 96 % del total de aminoácidos existentes en las proteínas procedentes de insectos, aunque con cantidades limitadas de algunos aminoácidos esenciales, como triptófano y lisina. En cuanto a la digestibilidad, se estima un promedio que va de un 77 a un 98 %, lo cual es mayor incluso que otras proteínas ya conocidas de alimentos, como algunas leguminosas y carne animal (Rahemm *et al.*, 2019; Belluco *et al.*, 2017; Doberman *et al.*, 2017). De hecho, algunas investigaciones recientes reportan que el consumo de 50 g de las especies *Eulepida mashona* (escarabajo) y *Henicus whellani* (grillo) pueden aportar a las personas un 30 % de la proteína diaria recomendada, lo que sitúa a los insectos como una buena fuente de proteína para los humanos (Manditsera *et al.*, 2019).

Como se mencionó anteriormente, el contenido de aminoácidos esenciales de los insectos puede presentar algunas limitantes, pero se han descrito especies que contienen los esenciales, mayoritariamente metionina, treonina y lisina; dos de estas especies son el *Rhynchophorus phoenicis* y *Rhynchophorus bilineatus*, que habitan en Nigeria. En esta población de África se alimentan principalmente de cereales y tubérculos, conocidos por su insuficiencia en lisina, lo cual a menudo produce una deficiencia de este aminoácido. Así, es evidente que estas especies podrían ser la solución a la problemática de esta región específica pero, así como en dicha zona particular, los insectos podrían solucionar algunas deficiencias nutrimentales en otras regiones del mundo (Raheem *et al.*, 2018).

Tabla 1. Contenido nutrimental de insectos más consumidos a nivel mundial

Insecto	Orden	Proteína (g/100 g)	Lípidos (g/100 g)	Hidratos de carbono (g/100 g)	Energía total (kcal/100 g)
Escarabajos	Coleoptera	3.7-54	3.7-52	12-34	126-574
Moscas	Hemiptero	17.5-67	4.2-31	8.38-23	199-460
Abejas, avispas y hormigas	Hymenoptera	1-81	1.3-62	5-94	234-593
Mariposas y polillas	Lepidoptera	13.2-69.6	7-77	3-41	126-762
Saltamontes, grillos y langostas	Orthoptera	13-77	2-27	16-30	117-436

Adaptada de Soares de Castro, *et al.* (2018).

La grasa es el segundo componente con mayor presencia en los insectos. Se pueden encontrar valores que oscilan entre 7 y 77 %, y las larvas tienen el contenido más alto (Ramos-Elorduy *et al.*, 1997). Su perfil de ácidos grasos insaturados es parecido al de algunas aves de corral y pescados blancos, pero tienen un mayor contenido de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA). En función del orden, los insectos pueden contener poca o ninguna traza del ácido eicosapentaenoico (EPA) y ácido docosahexaenoico (DHA), pero contienen ácido linoleico (C18: 2) y ácido linolénico (C18: 3), utilizados en el organismo humano para sintetizar ácido araquidónico (C20: 4) y EPA (Rumpold y Schlüter, 2013).

Un aspecto importante que influye en el contenido de grasa en los insectos es su alimentación, pues estudios han reportado que los niveles de EPA y DHA pueden aumentar en las moscas (*Hermetia illucens*) cuando son alimentadas con residuos de pescado (St-Hilaire *et al.*, 2007), aunque aún se necesitan más investigaciones que respalden esta afirmación. El estado de madurez también puede influir en el contenido total de grasa. Se ha encontrado que las larvas generalmente tienen un contenido más alto que los adultos y los insectos con cuerpo blando, como las termitas; también tienen niveles más altos de grasa que los insectos con un exoesqueleto duro, como los grillos y saltamontes (Doberman *et al.*, 2017; Schlüter *et al.*, 2017).

Finalmente, los hidratos de carbono que se encuentran en algunas especies de insectos incluyen a la quitina y el glucógeno.

El glucógeno se almacena principalmente en los músculos y el cuerpo grasoso. Por otra parte, la quitina es el componente principal del exoesqueleto y la cantidad presente dependerá de la especie y el estado de desarrollo (Schlüter *et al.*, 2017). La quitina puede ser utilizada en la industria alimentaria en forma de quitosano, el cual podría emplearse en alimentos como agente espesante, prebiótico o antimicrobiano; sin embargo, debe estudiarse a fondo si estas fracciones de quitina de insectos tienen contaminantes o alérgenos que requieran una etapa extra de eliminación para que no representen un peligro para la salud de las personas (Zhang *et al.*, 2011).

2.2. Micronutrientes: vitaminas y minerales

Los micronutrientes, vitaminas y minerales son sustancias necesarias para el crecimiento y desarrollo adecuado de las personas, se requieren en cantidades pequeñas y se encuentran involucradas en diversos procesos metabólicos que le permiten al cuerpo producir enzimas, hormonas y otros compuestos esenciales. Hoy en día, la desnutrición por micronutrientes afecta a más de 2,000 millones de personas en el mundo. En este sentido, los insectos pueden ser una opción que incluir en la alimentación, ya que también son ricos en algunos micronutrientes (Mwangi *et al.*, 2018).

El contenido de dichos micronutrientes puede variar considerablemente entre especies, y también depende del ambiente

y algunos contaminantes presentes en el entorno. Dentro de los minerales que proveen los insectos se encuentran el hierro, zinc, potasio, sodio, calcio, fósforo, manganeso y cobre. Y entre las vitaminas que se pueden encontrar dentro de su composición están las lipofílicas, riboflavina, ácido pantoténico, ácido fólico, entre otras (Rumpold y Schlüter, 2013; Doberman, Swift y Fiel, 2017).

En los insectos se han encontrado cantidades de hierro que van desde 18 hasta 1562 mg/100 g de materia seca; en las hormigas se reportaron los niveles más bajos (17.7 mg/100 g), los niveles medios en termitas (90 a 300 mg/100 g), y los que tienen mayor cantidad de hierro son los grillos (1562 mg/100 g); por su parte, el pollo y la carne de res proporcionan 1.2 y 3 mg por cada 100 g (base seca) de hierro, respectivamente. Aunque las cifras favorecen a los insectos, lo cierto es que todavía no han sido identificados ni el tipo de hierro que contienen, ni su biodisponibilidad (Christensen *et al.*, 2006; Doberman, Swift y Fiel, 2017; Tao y Li, 2018).

Otro mineral que los insectos pueden aportar en una cantidad adecuada para la dieta de las personas es el zinc. Estudios reportan que se pueden encontrar hasta 26.5 mg por cada 100 g (base seca) en insectos como *R. phoenicis*, lo que cubre la ingesta diaria recomendada (IDR), que va de 8 a 13 mg (Kathlee-Mahan y Escott-Stump, 2017; Tao y Li, 2018). También se han registrado altos contenidos de potasio y sodio en las ninfas del grillo (*Acheta domesticus*); calcio, fósforo y manganeso en grillos adultos (*Acheta domesticus*); y cobre en la polilla emperador (*Usta terpsichore*) (Nadeau *et al.*, 2015; Govorushko, 2019).

3. Seguridad alimentaria

El artículo 25 de la Declaración Universal de los Derechos Humanos establece que la alimentación es un derecho primordial de todas las personas. Con base en lo anterior, en la década de los noventa se construyó el concepto actual de seguridad alimentaria, definido como el suministro de alimentos inocuos, nutritivos y suficientes que debe estar disponible y ser de acceso ilimitado a la población (Asamblea General de la ONU, 1948).

3.1. El papel de los insectos en la seguridad alimentaria

De acuerdo con el objetivo de desarrollo sostenible de la ONU «Hambre Cero», se necesitan esfuerzos intensificados para mejorar el valor de los alimentos mediante el procesamiento

rentable de materiales comestibles, de forma que los componentes nutrimentales cumplan con las dietas diarias recomendadas y proporcionen alimentos que puedan brindar salud y beneficios (Olamide *et al.*, 2020).

La FAO (2019) propone la cría de insectos para consumo humano como una de las muchas vías para abordar la seguridad de alimentos en el mundo. Los insectos están en todas partes, ya que constituyen el 90 % de especies animales conocidas, se reproducen velozmente y poseen tasas elevadas de crecimiento y conversión de piensos, así como un reducido impacto ambiental durante su crianza. Son considerados alimentos nutritivos, pues contienen niveles elevados de proteínas, grasas y micronutrientes (Meyer-Rochow, 2019). Pueden criarse aprovechando diversos flujos de residuos, como los de alimentos. Además, es posible consumirlos enteros o molidos, en forma de polvo o pasta, e incorporarse a otros alimentos (Van Huis y Oonincx, 2017). El uso de insectos a gran escala como ingrediente en la composición de piensos es totalmente viable, y en diversas partes del mundo ya existen empresas consolidadas que están a la vanguardia en este sentido (Olamide *et al.*, 2020).

3.2. Ventajas del uso de insectos como fuente alimentaria

3.2.1. Ambiental

El impacto medioambiental de la producción de alimentos es cada vez mayor, principalmente en lo que respecta a las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), el uso de agua y de tierra. Actualmente, la ganadería utiliza alrededor del 70 % de la tierra agrícola disponible en todo el mundo (Oonincx y De Boer, 2012). A medida que incrementa la demanda de carne, es necesario aumentar la crianza de ganado, lo que requiere más tierra. A su vez, este ganado precisa más alimento, lo que conlleva más cantidad de tierra cultivable para producir forraje, lo cual frecuentemente implica deforestación y/o un mayor uso de fertilizantes (Raheem *et al.*, 2019).

La ganadería contribuye al calentamiento global al producir aproximadamente el 14 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provocadas por el hombre. También crea del 59 al 71 % de las emisiones mundiales de amoníaco agrícola, que causan la acidificación del suelo y las masas de agua, lo

cual puede dañar la vida vegetal y animal. Además, la demanda de agua para su producción es elevada, ya que para producir un kilo de carne de vacuno se requieren hasta 43,000 litros de agua (Gerber *et al.*, 2013; Pimentel *et al.*, 2004; Van Huis, 2020).

En comparación con los enfoques tradicionales de la ganadería, la crianza de insectos es más eficiente en la conversión de alimentos (ECA), produce menos emisiones de GEI, requiere pocas áreas de uso de la tierra y disminuye la contaminación del agua (Sun-Waterhouse *et al.*, 2016). Se ha estimado que la superficie de tierra necesaria para producir la misma cantidad de proteína es de aproximadamente una hectárea para los gusanos de la harina (*Tenebrio molitor*), dos a 3.5 hectáreas para los cerdos o pollos y diez hectáreas para el ganado (Oonincx y De Boer, 2012). El reemplazo de la crianza de ganado por insectos como una fuente de proteínas podría desocupar 2,700 megahectáreas de pastos y 100 megahectáreas de tierras de cultivo, lo que, a su vez, resultaría en una gran absorción de carbono por el rebrote de la vegetación (Stehfest *et al.*, 2009).

El agua es un recurso no renovable, del cual se estima que el 70 % es utilizado por las industrias de ganadería y agricultura (Doreau *et al.*, 2012). La agricultura la necesita directamente para la producción de cultivos e indirectamente para la ganadería, con el objetivo de utilizarla en la producción de forrajes para la alimentación del ganado. En este sentido, el concepto de «eficiencia de conversión alimenticia» cobra importancia, ya que mide la cantidad de alimento necesaria para producir una determinada cantidad del producto final (carne, huevos, etc.). Los insectos son significativamente más eficientes que otros animales en términos de conversión alimenticia debido a que son de sangre fría y solo dependen de su entorno para controlar los procesos metabólicos, como su temperatura corporal (Doberman, Swift y Field, 2017; Van Huis, 2013).

Miglietta (2015) encontró que para poder calcular la huella hídrica por tonelada de producción de alimentos es importante tomar en cuenta la cantidad de agua utilizada y el porcentaje comestible del animal (80-100 % para insectos y 40-50 % para ganado). Considerando lo anterior, las especies de insectos estudiados, gusanos de la harina (*T. molitor* y *Z. morio*), tienen una huella hídrica menor que el ganado, lo cual hace pensar que el reemplazo en la crianza para alimento podría tener un impacto

positivo en la reducción del uso de agua (Doberman, Swift y Field, 2017; Lundy y Parrella, 2015).

3.2.2. Económica

Los factores económicos y sociales que hacen deseable la crianza de insectos sobre la ganadería son la baja tecnología y mínima inversión de capital requeridas para su recolección y reproducción, lo cual representa una alternativa económica a los sectores más pobres de la sociedad. Además, la crianza de insectos brinda oportunidades de subsistencia tanto para la población urbana como para la rural (Govorushko, 2019).

La cría de insectos puede ser rentable, dado que requiere poco tiempo en un espacio reducido, y su alimentación puede ser a base de productos de desecho, aunque de forma controlada. Pero cabe mencionar que es necesario optimizar los métodos de procesamiento —como el secado o congelación—, para tener un equilibrio entre la rentabilidad y las propiedades funcionales (Gravel y Doyen, 2020).

La producción de un kilo de proteína animal en la ganadería requiere en promedio 6 kg de proteína vegetal como alimento. Mientras que para los insectos la cantidad es mucho menor, ya que para la producción de un kilo de peso vivo de grillo común *Acheta domesticus* solo se requieren 1.7 kg de alimento (Collavo *et al.*, 2005).

Otro beneficio económico se encuentra en el ahorro de dinero gastado anualmente en pesticidas que protegen plantas agrícolas, como los cultivos de cereales pues, como propone Cerritos (2011), una idea alternativa para controlar las plagas es la captura mecánica de la biomasa de insectos para su posterior comercialización. Esta propuesta surgió debido a que la aplicación de insecticidas y plaguicidas no ha disminuido las pérdidas anuales asociadas con las plagas de insectos. La contradicción de la situación se encuentra en que los cultivos de cereales no contienen más del 14 % de proteínas, en tanto que se destruyen recursos alimenticios (insectos) que contienen hasta un 75 % de proteína animal de mayor calidad (Cerritos, 2011; Govorushko, 2019).

Finalmente, la exportación e importación de insectos para la alimentación desempeña un papel económico importante en todo el sudeste asiático: el mercado de importación en Tailandia está valorado en 1.14 millones de dólares por año (Hanboon-

song *et al.*, 2013). Dado que el valor de mercado de los insectos a menudo supera el de otras fuentes de proteínas estándar, su cultivo puede proporcionar un ingreso estable para los agricultores establecidos. Las granjas de tamaño mediano, que producen entre 500 y 750 kg de grillos de cuatro a cinco veces al año, pueden obtener ingresos netos de 4,270-9,970 dólares en un país donde el ingreso nacional bruto anual promedio per cápita es de aproximadamente 5,640 dólares. Las estimaciones sitúan el valor de los insectos como alimento y pienso para el mercado combinado de EE. UU., Bélgica, Francia, Reino Unido, Países Bajos, China, Tailandia, Vietnam, Brasil y México en 25.1 millones de libras esterlinas, con un crecimiento previsto de 398 millones para 2023. Se prevé que este crecimiento se verá impulsado en gran medida por una mayor conciencia de los consumidores y la aceptación de los insectos como fuente de alimento (Han, 2017; Doberman, Swift y Field, 2017).

3.2.3. Nutrimental

La desnutrición es una condición aún frecuente en el mundo. La ONU ha reportado que alrededor de 825 millones de personas sufren de hambre, con una mayor incidencia en áreas rurales (ONU, 2014; KNBS, 2010). Aunque la dieta proporcione suficientes calorías, puede carecer de los principales nutrientes (WHO, 2007), pues la alimentación en zonas rurales se basa principalmente en plantas y cereales con una densidad de nutrientes relativamente baja y pocas proteínas de alto valor biológico. Además, dicha comida puede contener factores antinutrientales, como el ácido fítico, taninos y compuestos fenólicos, que limitan la absorción de micronutrientes (Towo *et al.*, 2006).

La nutrición humana es especialmente importante el primer año después del nacimiento. Alrededor de los seis meses de edad la lactancia materna se debe complementar con otros alimentos, con el fin de aportar suficiente energía, macronutrientes y micronutrientes que propicien un desarrollo óptimo; de lo contrario, una nutrición deficiente en esta etapa resultará en defectos en el desarrollo físico y neurológico, o incluso en la muerte (Martin *et al.*, 2005). En la actualidad, a nivel mundial 61.3 millones de niños menores de cinco años sufren desnutrición y 144 millones tienen retraso del crecimiento debido a las deficiencias de proteína en su alimentación; también asociado a ello, hay 45 % de muertes de niños menores de cinco años. La UNICEF (2019) ha reportado que, a nivel mundial, al menos 59 % de niños de seis a 23 meses no tiene acceso a proteínas de alto valor bio-

lógico, como las que se encuentran en huevos, leche, pescado y carne. El mayor porcentaje de estos menores con deficiencias alimentarias se encuentra en zonas en desarrollo en Asia, África y América Latina, donde la proteína proveniente de insectos puede ser de gran ayuda para combatir la desnutrición proteica infantil a través del enriquecimiento de alimentos comunes y accesibles para la población (Sempoli y Gualdi-Russo, 2007; Raheem, 2019).

4. Uso de insectos en la industria alimentaria

4.1. Procesamiento de insectos para ser utilizados como ingredientes

Después de ser recolectados en la naturaleza o criados en un entorno domesticado, los insectos deben procesarse para el consumo humano o como alimento para ganado. Esto puede hacerse de diversas maneras: enteros, procesados en forma granular o pastosa, o mediante la extracción de ciertos componentes para elaborar productos alimenticios como barras energéticas, pastas y harinas (Obopile y Seeletso, 2013).

Cuando se consumen completos, los métodos de preparación tradicionales que se aplican son al vapor, hervidos, horneados, fritos, secados al sol o ahumados (Rumpold y Schlüter, 2015; Van Huis y Oonincx, 2017). Se pueden encontrar libros de cocina para la integración de los insectos a la alimentación humana, escritos por investigadores como Ramos-Elorduy (1998), Menzel y D'Aluisio (2004) y Van Huis *et al.* (2014).

Por otra parte, prepararlos en forma granulada y pastosa es una de las estrategias utilizadas con mayor frecuencia en países donde los consumidores no están acostumbrados a comer insectos enteros. Por ejemplo, Europa ha estado produciendo alimentos tradicionales a partir de insectos homogeneizados, que incluyen empanadas, pasta y pan. La trituración o molienda son métodos habituales para el procesamiento de una gran cantidad de productos que son más aceptados por los consumidores. Los polvos y pastas resultantes también se han añadido a otros productos con bajo contenido de proteínas para aumentar su valor nutrimental (Van Huis *et al.*, 2013).

En países como Corea del Sur se han estado desarrollando con éxito nuevas tecnologías para el tratamiento de insectos. Por ejemplo, las patentes para la refinación de polvo de gusano de seda, el método de fabricación de botanas de larva cigarra y el de polvo de gusano de la harina (Han *et al.*, 2017). No obstante, algunos de estos métodos ya se utilizaban en países con

una larga historia de entomofagia, como Tailandia y Laos, donde el polvo de chinche de agua gigante (*Lethocerus indicus*) es el ingrediente principal de una pasta de chile muy popular (Hanboonsong *et al.*, 2013; Van Huis *et al.*, 2013).

La técnica de extracción de ciertos componentes para añadirlos a los alimentos es utilizada como estrategia para incrementar el consumo de insectos en sociedades donde esto es poco común; de hecho, algunas empresas ya han comenzado la integración de estos extractos en productos de consumo frecuente como botanas, harinas, pastas, entre otros. Además, algunas investigacio-

nes han demostrado que la adición de estos extractos puede aportar beneficios tecno-funcionales a los productos (Mutungi *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2016) (tabla II). A menudo, las personas comprenden la idea del valor nutrimental de los insectos, pero prefieren no verlos en sus alimentos. En la mayoría de los casos se extraen proteínas, pero también es posible sustraer grasas, minerales y vitaminas. Hasta ahora, los procesos para la extracción de componentes alimentarios individuales son costosos, por lo que se necesita un mayor desarrollo de métodos rentables y prácticos para su uso comercial (Mlcek *et al.*, 2014; Van Huis *et al.*, 2013).

Tabla II. Productos alimenticios elaborados a base de insectos y comercializados en el mundo

Producto	Especie de insecto y estadio de desarrollo	Ingredientes del alimento	Marca o distribuidor
Mezcla para <i>brownie</i>	Grillos adultos (<i>G. sigillatus</i>)	Azúcar, cocoa, harina de arroz, harina de tapioca, grillos en polvo	Cricket flours, Oregón, EE. UU. (http://www.cricketflours.com)
Harina para hornear alta en proteína	Grillos adultos (<i>A. domesticus</i> ; <i>G. assimilis</i>)	Harina de mandioca, polvo de grillo, almidón de tapioca, goma xantana	Bitty Foods, San Francisco, California, EE. UU. (http://www.bittyfoods.com)
Barras proteicas	Grillos adultos (<i>A. domesticus</i>), larvas	Insectos (4.2 % larvas, 1 % grillos), frutas, nueces, chocolate	Gryo, Francia (http://gryo-bars.com)
	Grillos adultos (<i>A. domesticus</i>)	Polvo de proteína de grillo, frutas	Chapul Cricket Protein, Utah, EE. UU. (http://chapul.com/)
Productos de pasta	Polvo de grillos maduros (<i>A. domesticus</i> ; <i>G. assimilis</i>)	Polvo de grillo (20 %), harina de trigo (80 %)	Bugsolutely Ltd., Tailandia (http://www.bugsolutely.com)
		Polvo de grillo (5 %), harina de espirulina (15 %)	Insectement Votre, Francia (http://www.insectement-votre.com)
Botanas de insectos enteros	Grillos adultos (<i>A. domesticus</i>), larvas de varios insectos (orugas, larvas de gusano de seda y harina)	Grillos asados (bocadillos)	Cricket Flours, Oregón, EE. UU. (http://www.cricketflours.com)
Insectos con coberturas	Gusano de la harina (<i>T. molitor</i>), grillos y escorpiones	Insectos asados o fritos	Hiso Smilebull, Tailandia (http://www.smilebull.co.th)
		Insecto entero bañado en chocolate	Hotlix, Grover Beach, California, EE. UU. (http://www.hotlix.com)
<i>Chips</i> horneadas	Grillos (<i>A. domesticus</i> , <i>G. sigillatus</i>)	Insectos en polvo, harina de maíz, harina de chícharo	Chirps Chips, EE. UU. (http://chirpschips.com)
Untables	Gusano de la harina (<i>T. molitor</i>)	Pasta de insecto, chocolate	The Green Kow Company, Bélgica (http://www.greenkow.be)

Adaptada de Lamsal *et al.* (2018).

4.2. Aplicaciones funcionales de la proteína de insecto en la industria alimentaria

Por el momento no hay un conocimiento amplio sobre los atributos funcionales de las proteínas y lípidos de los insectos. Tampoco hay suficiente información acerca de las propiedades fisicoquímicas de estos macronutrientes, las cuales son importantes para una adecuada producción, procesamiento y comercialización de productos elaborados a partir de insectos (Jones, 2016).

Por ejemplo, en muchos países africanos se han estudiado insectos utilizados en alimentos secos. Se ha analizado la capacidad de formación de espuma de harinas elaboradas a partir de larvas de *Oryctes owariensis* y *Cirina forda*, y se ha encontrado que tienen poca o nula formación de espuma; asimismo, se encontraron comportamientos similares en extractos de proteína de otras cinco especies de insectos. Esto puede indicar que dicha proteína es inútil como agente espumante para utilizar en la industria alimentaria (Wilson-Bessa *et al.*, 2020; Gravel y Doyen, 2020). Sin embargo, se encontró que estas mismas harinas tienen buena gelificación (al igual que las proteínas provenientes de las otras cinco especies de insectos), lo que indicaría que pueden ser un buen agente gelificante. Las harinas de insectos suelen tener alta capacidad de absorción de agua y lípidos, así como buena capacidad emulsificante, lo que sugiere que serían ideales como ingredientes texturizantes y retenedores del sabor (Osasona y Olaofe, 2010).

Es necesario seguir investigando las implicaciones industriales y las aplicaciones potenciales de sus propiedades funcionales, ya que hay muchos factores que podrían alterar la funcionalidad de las proteínas de insectos, como las condiciones de procesamiento y las interacciones con otros ingredientes (Wilson-Bessa *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

La producción de alimentos actual se enfrenta a serios desafíos: la sobreexplotación de recursos naturales no renovables como el agua, la sobreproducción de gases de efecto invernadero y el hecho de que la superficie terrestre mundial es insuficiente para satisfacer la creciente demanda de proteína. Esto indica la necesidad de buscar alternativas alimenticias, pues se mitigarían estos efectos negativos en el medio ambiente y se garantizaría una producción de alimento suficiente para la población creciente. En este sentido, los insectos ofrecen muchos beneficios ambientales en comparación con el ganado convencional, mientras que la calidad nutricional es similar. Aún es complicado aceptarlos como fuente de alimento, pero ello está ganando impulso en los países occidentales, donde se emplean una serie de estrategias para convencer a los consumidores, como la incorporación de los insectos a productos con los que están familiarizados. Está surgiendo un nuevo sector agrícola y una nueva fuente de alimentación, pero aún hacen falta investigaciones y desarrollo de tecnologías para que su procesamiento e inclusión sean rentables a nivel mundial.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)— y a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por las becas otorgadas para sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Batat, W. y Peter, P. (2020). The healthy and sustainable bugs appetite: factors affecting entomophagy acceptance and adoption in Western food cultures. *Journal of consumer marketing*, 31(3), 291-303.
- Belluco, S., Halloran, A. y Ricci, A. (2017). New protein sources and food legislation: the case of edible insects and EU law. *Food Security*, 9, 803-14.
- Bernard, T. y Womeni, H. M. (2017). Entomophagy: insects as food. *Insect Physiology and Ecology*, 233-249.
- Bodenheimer, F. S. (1951). *Insects as Human Food: A Chapter of the Ecology of Man*. Springer Dordrecht.
- Cerritos, R. (2009). Insects as food: An ecological, social and economical approach. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 4(27), 1-10.
- Cerritos, R. (2011). Grasshoppers in agrosystems: Pest or food? *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science Nutrition and Natural Resources*, 6, 1-9.
- Christensen, D. L., Orech, F. O., Mungai, M. N., Larsen, T., Friis, E. et al. (2006) Entomophagy among the Luo of Kenya: a potential mineral source? *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 57, 198-203.
- Collavo, A., Glew, R. H., Huang, Y. S., Chuang, L. T., Bosse, R. y Paoletti, M. G. (2005). House cricket small-scale farming. En M. G. Paoletti (Ed.). *Ecological implications of minilivestock: Potential of insects, rodents, frogs and snails*. Science Publishers.
- Doberman, D., Swift, J. A. y Field, L. M. (2017). Opportunities and hurdles of edible insects for food and feed. *Nutrition bulletin*, 42, 293-308.
- Doreau, M., Corson, M. S. y Wiedemann, S. G. (2012) Water use by live- stock: a global perspective for a regional issue? *Animal Frontier's*, 2, 9-16.
- Estolano-Macedo, I. M., Rosetti-Veloso, R. R., Ferreira-Medeiros, H. A., De Fátima-Padilha, M. R., Da Silva-Ferreira, G. et al. (2017). Entomophagy in different food cultures. *Revista Geama Recife*, 3(2), 58-62.
- Feng, Y., Chen, X. M., Zhao, M., He, Z., Sun, L., Wang, C. Y. y Ding, W. F. (2018). Edible insects in China: Utilization and prospects. *Insect Science*, 25(2), 184-198.
- Figueroa, K. A., Badillo, E., Anaya, S. y González, V. (2002). *Estudio de la comercialización en la ciudad de Oaxaca, Oaxaca y la comunidad de Santa María Zacatepec, Puebla, de chapulín (Sphenarium spp.) industrializado* [Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados].
- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). (2019). *Niños, alimentos y nutrición. Resumen Ejecutivo*.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2013). *Edible Insects: Future prospects for food and feed security*.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). *The future of food and agriculture- Trends and challenges*.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *The State of Food Security and Nutrition in the World; Safeguarding Against Economic Slowdowns and Downturns*.
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. y Tempio, G. (2013). Tackling climate change through livestock - A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Govorushko, S. (2019). Global status of insects as food and feed source: A review. *Trends in food Science y Technology*, 91, 436-445.
- Gravel, A. y Doyen, A. (2020). The use of edible insect protein in food: Challenges and issues related to their functional properties. *Innovative food science and emerging technologies*, 59.
- Han, R., Shin, J. F., Kim, J., Choi, J. S. y Kim, J. K. (2017). An overview of the South Korean edible insect food industry: challenges and future pricing/promotion strategies. *Entomological Research*, 47, 141-51.
- Hanboonsong, Y., Jamjanya, T. y Durst, P. B. (2013). Six-Legged Livestock: Edible Insect Farming, Collecting and Marketing in Thailand. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hazarika, A., Kalita, U., Khanna, S., Kalita, T. y Choudhury, S. (2020). Diversity of edible insects in a natural world heritage site in India: entomophagy attitudes and implications for food security in the region. *PeerJ life and environmental*, 8.
- Hernández, R. J. C., Avendaño, G. B., Enríquez, T. y Jarquin, C. M. (2020). Acceso económico al insecto comestible *Sphenarium purpurascens* en la Sierra Sur de Oaxaca, México. *Revista Española de Nutrición Comunitaria*, 26(1).
- Jones, O. G. (2016). Recent advances in the functionality of non-animal-sourced proteins contributing to their use in meat analogs. *Current Opinion in Food Science*, 7, 7-13.

- Kathleen-Mahan, L. y Escott-Stump, S. (2017). *Krause Dietoterapia*. Elsevier Masson.
- Kelemu, S., Niassy, S., Torto, B., Fiaboe, K., Affognon, H., Tonnang, H., Maniania, N. K. y Ekesi, S. (2015). African edible insects for food and feed: Inventory, diversity, commonalities and contribution to food security. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(2), 103-119.
- Kim, H. W., Setyabrata, D., Lee, Y. J., Jones, O. G. y Kim, Y. H. B. (2016). Pre-treated mealworm larvae and silkworm pupae as a novel protein ingredient in emulsion sausages. *Innovative Food Science Emerging technology*, 38, 116-23.
- KNBS (2010). *Kenya Population Census, 2009*. Nairobi: Ministry of State for Planning, National Development and Vision 2030. Government Print Press.
- Lamsal, B., Wang, H., Pinsirodom, P. y Dossey, A. T. (2018). Applications of Insect-Derived Protein Ingredients in Food and Feed Industry. *Journal of the American Oil Chemists' Society*.
- Lundy, M. E. y Parrella, M. P. (2015). Crickets are not a free lunch: protein capture from scalable organic side-streams via high-density populations of *Acheta domesticus*. *PLoS ONE*, 10, 1-12.
- Manditsera, F. A., Luning, P. A., Fogliano, V. y Lakemond, C. M. (2019). The contribution of wild harvested edible insects (*Eulepida mashona* and *Henicus whellani*) to nutrition security in Zimbabwe. *Journal of Food Composition and Analysis*, 75, 17-25.
- Martin, R. M., Gunnell, D. y Davey Smith, G. (2005). Breastfeeding in infancy and blood pressure in later life: Systematic review and meta-analysis. *American Journal of Epidemiology*, 161(1), 15-26.
- Menzel, P. y D'Aluisio, F. (2004). *Man Eating Bugs: The Art and Science of Eating Insects*. Ten speed Press.
- Meyer-Rochow, V. B. (2019). Insects (and other non-crustacean arthropods) as human food. *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*, 1, 416-421.
- Miglietta, P. P., De Leo, F., Ruberti, M. y Massari, S. (2015). Melaworms for food: A water footprint perspective. *Water*, 7, 6190-6203. doi:10.3390/w7116190
- Mlcek, J., Rop, O., Borkovcova, M. y Bednarova, M. (2014). A Comprehensive Look at the Possibilities of Edible Insects as Food in Europe - a Review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 64(3), 147-157.
- Molina-Nery, M. C., Ruiz-Montoya, L., Castro-Ramírez, A. E., González-Díaz A. A. y Caballero-Roque, A. (2017). The effect of agricultural management on the distribution and abundance of *Arsenura Armida* (Lepidoptera: Saturniidae) in Chiapas, México. *Journal of the Lepidopterist's Society*, 71(4), 236-248.
- Mutungu, C., Irungu, F. G., Nduko, J., Mutua, F., Affognon, H. y Nakimbugwe, D. (2017). Postharvest processes of edible insects in Africa: A review of processing methods, and the implications for nutrition, safety and new products development. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. doi:10.1080/10408398.2017.1365330
- Mwangi, M., Oonincx, D., Stouten, T., Veenenbos, M., Melse-Boonstra, A. et al. (2018). Insects as sources of iron and zinc in human nutrition. *Nutrition Research Reviews*, 31(2), 248-255. doi:10.1017/S0954422418000094
- Nadeau, L., Nadeau, I., Franklin, F. y Dunkel, F. (2015). The potential for entomophagy to address undernutrition. *Ecology of Food and Nutrition*, 54, 200-208. doi:10.1080/03670244.2014.930032.
- Nonaka, K. (2009). Feasting on insects. *Entomological research*, 39(5), 304-312.
- Obopile, M. y Seeletso, T. G. (2013). Eat or not eat: an analysis of the status of entomophagy in Botswana. *Food Security*, 5(6), 817-824. doi:10.1007/s12571-013-0310-8
- Olamide-Kewuyemi, Y., Kesa, H., Enyinnaya-Chinma-C y Ayodeji-Adebo, O. (2020). Fermented edible insects for promoting food security in Africa. *Insects*, 11, 283. doi:10.3390/insects11050283
- Oonincx, D. G. y de Boer, I. J. (2012). Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans: A life cycle assessment. *PLoS One*, 7(12), e51145.
- Organización de las Naciones Unidas. (1948). Declaración Universal de Derechos Humanos.
- Organización de las Naciones Unidas. (2014). Millennium development goals report.
- Osasona, A.I. y Olaofe, O. (2010). Nutritional and functional properties of *Cirina forda* larva from Ado-Ekiti, Nigeria. *African Journal of Food Science*, 4, 775-777.
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B. et al. (2004). Water resources: agricultural and environmental issues. *BioScience*, 54, 909-918.
- Pino-Moreno, J. M., García, A., Barreto, S. D. y Martínez, E. O. (2016). Utilization and trade of edible grasshoppers in the western region of the state of Morelos, Mexico. *Journal of Insects Food and Feed*, 2, 27-36.
- Pino-Moreno, J.M. y Reyes-Prado, H. (2020). Commerce of edible insects in the state of Morelos, México. *Journal of Insect Science*, 20(5), 1-7.
- Raheem, D., Carrasco, C., Bolanle-Oluwole, B., Nieuwland, M. y Saraiva, A. (2018). Traditional consumption of and rearing edible insects in Africa, Asia and Europe. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1549-7852.
- Raheem, D., Raposo, A., Bolanle-Oluwole, B., Nieuwland, M. y Saraiva, A. (2019). Entomophagy: nutritional, ecological, safety and legislation aspects. *Food Research International*, 126. doi:10.1016/j.foodres.2019.108672
- Ramos-Elorduy, J., Moreno, J. y Prado, E. (1997). Nutritional value of edible insects from the state of Oaxaca, Mexico. *Journal of Food Composition and Analysis*, 10, 142-57.

- Ramos-Elorduy, J. (1998). *Creepy Crawly Cuisine: The Gourmet Guide to Edible Insects*. Park Street Press.
- 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., Pino-Moreno, J. M. y Conconi, M. (2006). Ausencia de una reglamentación y normalización de la explotación y comercialización de insectos comestibles en México. *Folia Entomológica Mexicana*, 45, 291-318.
- Ramos-Elorduy, J., Pino-Moreno, J. M., Angeles, S. C. y García, A. (2007). Valor nutritivo del género *Eristalis* sp. (*Diptera-Syrphidae*) del Lago de Texcoco. *Entomológica Mexicana*, 6, 1092-1098.
- Ramos-Elorduy, J. (2009). Anthro-po-entomophagy: Cultures, evolution and sustainability. *Entomological Research*, 39, 271-288.
- Ramos Elorduy, J., Pino-Moreno, J. M. y Martínez, V. H. (2018). Algunos aspectos referentes a los insectos comestibles de México. En Morales, V. C., Rozat, G., y Mapres, C. (Eds.). *Comida Mexicana (Riqueza Biológica, contextos y evolución histórica)* (pp. 101-121). Secretaría de Cultura.
- Rumpold, B. A. y Schlüter, O. K. (2013). Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Molecular Nutrition and Food Research*, 57, 802-23.
- Rumpold, B. A. y Schlüter, O. K. (2015). Insect-based protein sources and their potential for human consumption: Nutritional composition and processing. *Animal frontiers*, 5(2), 20-24.
- Schlüter, O., Rumpold, B., Holzhauser, T., Roth, A. y Vogel, R. (2017). Safety aspects of the production of foods and food ingredients from insects. *Molecular Nutrition and Food Research*, 61(6), 1-14.
- Semproli, S. y Gualdi-Russo, E. (2007). Childhood malnutrition and growth in a rural area of Western Kenya. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 132(3), 463-469.
- Soares de Castro, R. J., Ohara, A., Goncalves Dos Santos Aguilar, J., Fontenele-Dominigues, M. A. (2018). Nutritional, functional and biological properties of insect proteins: Processes for obtaining, consumption and future challenges. *Trends in food Science y technology*, 76, 82-89.
- Stehfest, E., Bouwman, L., Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G., Eickhout, B. y Kabat, P. (2009). Climate benefits of changing diet. *Climatic Change*, 95(1), 83-102.
- St-Hilaire, S., Cranfill, K. y McGuire, M. (2007). Fish offal recycling by the black soldier fly produces a foodstuff high in Omega-3 fatty acids. *Journal of the World Aquaculture Society*, 38, 309-13.
- Sun-Waterhouse, D., Waterhouse, G. I., You, L., Zhang, J., Liu, Y. et al. (2016). Transforming insect biomass into consumer wellness foods: A review. *Food Research International*, 89, 129-151.
- Tao, J. y Li, Y. O. (2018). Edible insects as a means to address global malnutrition and food insecurity issues. *Food Quality and Safety*, 2, 17-26.
- Towo, E., Matuschek, E. y Svanberg, U. (2006). Fermentation and enzyme treatment of tannin sorghum gruels: Effects on phenolic compounds, phytate and *in vitro* accessible iron. *Food Chemistry*, 94(3), 369-376.
- Vadivelu-Amarender, R., Bhargava, K., Dosser, A. T. y Gamagedara, S. (2020). Lipid and protein extraction from edible insects-Crickets (*Gryllidae*). *Food Science and Technology*, 125, 1-4.
- Van Huis, A. (2013). Potential of insects as food and feed in assuring food security. *Annual Review of Entomology*, 58, 563-583.
- Van Huis, A., Van Itterbeeck, J., Klunder, H. et al. (2013). Edible Insects: Future Prospects for Food and Feed Security. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Van Huis, A., van Gorp, H. y Dicke M. (2014). *The Insect Cookbook, food for a Sustainable planet*. Columbia University Press.
- Van Huis, A. y Oonincx, D. G. A. B. (2017). The environmental sustainability of insects as food and feed. *A review. Agronomy for Sustainable Development*, 37-43.
- Van Huis, A. (2020). Nutrition and health of edible insects. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 23, 228-231. doi:10.1097/MCO.0000000000000641
- WHO (World Health Organization) (2007). Protein and amino acid requirements in human nutrition.
- Wilson-Bessa, L., Pieterse, E., Sigge, G. y Hoffman, L.C. (2020). Insects as human food; from farm to fork. *Journal Science Food Agriculture*, 100, 5017-5020.
- World Health Organization (2020). Malnutrition.
- Yen, A. L. (2015). Insects as food and feed in the Asia Pacific region: Current perspectives and future directions. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(1), 33-55. doi:10.3920/JIFF2014.0017.
- Yhoun-Aree, J. (2010). Edible insects in Thailand: Nutritional values and health concerns. En P. B. Durst, D. V. Johnson, R. N. Leslie, y K. Shono (Eds.), *Forest insects as food: Humans bite back. Proceedings of a workshop on Asia-Pacific resources and their potential for development*. Food and Agriculture Organization.
- Zhang, A. J., Qin, Q. L., Zhang, H., Wang, H. T. et al. (2011). Preparation and characterisation of food-grade chitosan from housefly larvae. *Czech Journal of Food Science*, 29, 616-623.

UDLAP[®]

Departamento de Ingeniería Química,
Alimentos y Ambiental